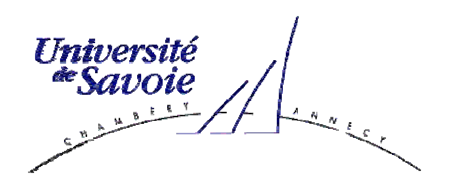
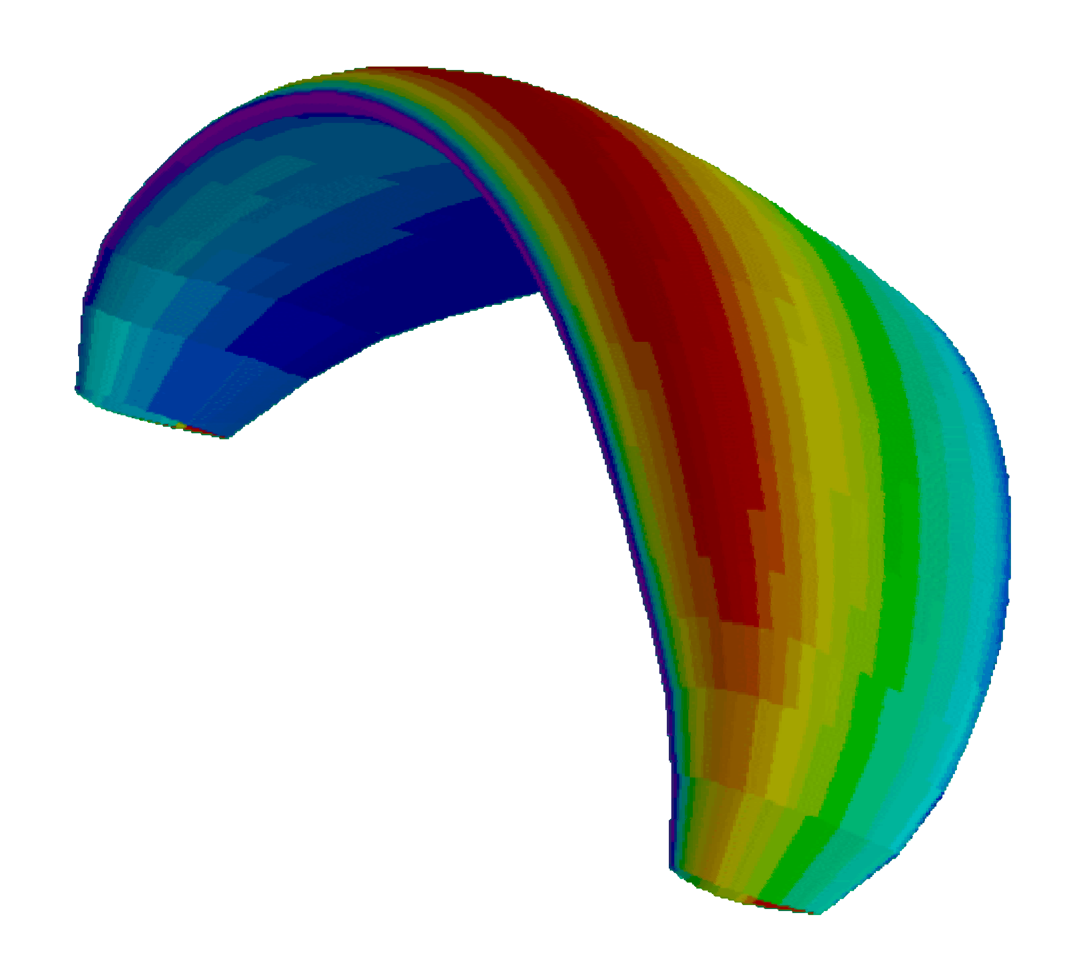


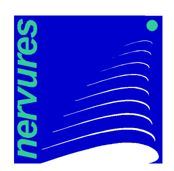
Modélisation d'un parapente

Rapport de stage de DESS d'Ingénierie Mathématiques de l'Université de Savoie

Septembre 1999



Rédigé par : Jérôme Sarthe







Modélisation d'un parapente

Jérôme Sarthe
(jerome.sarthe@wanadoo.fr)

"A bird is an instrument working according to
mathematical law.
It lies within the power of man to make this
intrument with all its motion"

Léonardo de Vinci



Avant-propos

Ce document, ainsi que le programme de simulation dont il est question dans ces quelques pages ont été réalisés pour la société NERVURES (Conception et fabrications de parapentes), dans le cadre d'un stage de DESS (Diplôme d'Etudes Supérieures Spécialisées) de l'Université de Savoie.

Pierre Puiseux, maître de conférences à l'Université de Pau, et Xavier Demoury, directeur de NERVURES, ont largement participé à l'élaboration du programme par l'apport de leurs connaissances et de leur expérience de la modélisation.

SOMMAIRE

1 Introduction : voler !

Qu'est ce que le parapente ?

Depuis quelques années, quelque chose a changé dans le ciel. Il suffit de lever la tête par un jour de beau temps pour constater la présence de grands oiseaux de tissu et de ficelles réalisant le vieux rêve de l'humanité :





La différence entre le parapente et n'importe quel autre aéronef, c'est sa simplicité. C'est un avion de quelques kilos qui se plie au fond d'un sac et qui décolle en quelques mètres sur n'importe quel petit bout de pente.

C'est depuis le Pertuiset, à Mieussy, un petit village de la Haute Savoie, que le parapente va envahir la planète. En 1978, deux parachutistes découvrent un moyen bon marché de s'entraîner à la précision d'atterrissage, leur discipline favorite en parachutisme et inventent sans le savoir le parapente.



Gérard Bosson et Jean-Claude Bétemp sur les pentes du Pertuiset en 1978

Les premières voiles sont alors des parachutes de saut rectangulaires légèrement modifiés.

Depuis ce jour, le parapente n'a cessé d'évoluer. Il s'est exporté dans tous les pays du monde, s'est trouvé de nouveaux adeptes parmi les non-parachutistes. Il a conquis la montagne et gravi les sommets les plus prestigieux ; Cervin, Mont-Blanc, Aconcagua ainsi que la plupart des sommets Himalayens dont l'Everest…

La parapente évolue rapidement, et de même qu'un gamin qui barbote joyeusement avec une bouée à tête de canard n'a pas lu Archimède, il est possible de très bien voler sans être un expert en mécanique ou en aérodynamique. Les premiers temps, ce sport apparaît comme un simple jeu avec l'air pour apprendre à contrôler son aile dans les différentes conditions de vol, mais on découvre très vite son immense complexité. De la compréhension de la météorologie, à celle de l'aérologie, de la psychologie du vol en compétition aux aspects techniques de la conception d'une aile, tous ces sujets se révèlent vite fascinants.

Aussi il n'est pas étonnant que quelques adeptes de ce sport nouveau ont rapidement essayés de mettre le vol en équations afin d'améliorer les ailes et de prolonger ces vols. Les constructeurs ont alors commencé de comprendre la mécanique du vol et ont fait évoluer leurs voiles vers plus de performances.

2 Description d'un parapente

Afin de mieux comprendre ce qui suit, il convient de fixer les idées sur ce qu'est techniquement un parapente et de définir un certain vocabulaire autour de ses différents constituants.

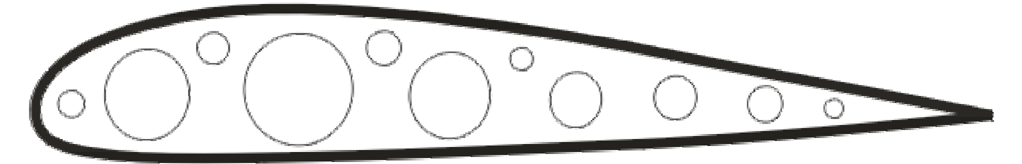


1. Extrados
2. Intrados
3. Stabilisateur
4. Nervures
5. Bord d'attaque
6. Bord de fuite
7. Commande de manœuvre
8. Elévateur
9. Suspentes

2.1 La voile

Les deux pièces principales de la voile sont l'*extrados* (1) – la partie supérieure du profil – et l'*intrados* (2) – la partie inférieure.

L'extrados et l'intrados sont reliés entre eux par des pièces de tissu verticales qui donnent à la voile la forme de son profil. Ce sont les *nervures* (ou *intercaissons*). Ces nervures comportent des ouvertures qui permettent à l'air de circuler à l'intérieur de la voile.



Détail d'une nervure



On peut voir distinctement par transparence les nervures percées d'ouvertures.

Une partie de la voile délimitée par deux nervures, l'intrados et l'extrados s'appelle un *caisson*. L'avant de la voile se nomme le *bord d'attaque*. L'arrière de la voile se nomme le *bord de fuite*. De chaque côté de l'aile, on trouve les stabilisateurs chargés de réduire la traînée[1] .

Au bord d'attaque sont placées des ouvertures permettant aux caissons de se gonfler et de former le profil de la voile l'autorisant à s'envoler. Tout le travail de voilerie (couture) consiste à ce que le parapente une fois gonflé soit le plus fidèle au modèle imaginé et étudié par le concepteur ingénieux.

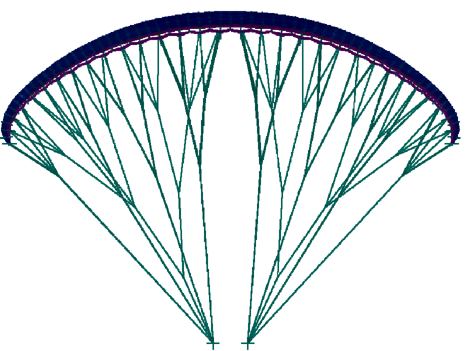
[1] Cf. : les forces aérodynamiques (5.1.3) et la traînée induite (5.2.1 c)

2.2 Le pilote et les suspentes.

En l'air, le pilote du parapente est installé (confortablement) dans une *sellette* suspendue par deux points d'attache.



La sellette est reliée à la voile par des *suspentes* en kevlar ou en polyéthylène selon les modèles et par les *élévateurs*. L'ensemble des suspentes forme le *cône de suspentage* (ou suspentage) qui atteint aujourd'hui des longueurs variant de 6 à 9 mètres.

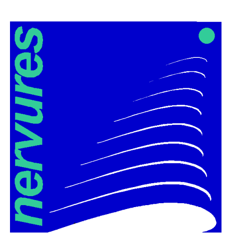


cône de suspentage (de face) d'une voile moderne

C'est cette longueur importante qui donne au parapente son excellente stabilité pendulaire mais qui rend également les équations régissant le vol plus complexes (cf. : équilibre longitudinal).

Le pilote garde toujours, dans les mains, deux poignées, qui sont les commandes de manœuvre, et qui lui serviront à se diriger.

3 Qui est Nervures ?



3.1 L'entreprise

Nervures, créée en fin d'année 1993, est une SARL de capital 150 KF.

La société Nervures emploie aujourd'hui 7 personnes en CDI et 4 en CDD dans un local de 800 m^2 qu'elle a acquis dans la Z.I. Point Sud de Soulom (65). L'exercice 1998 (C.A. 3 MF) est bénéficiaire.

L'entreprise se trouve aujourd'hui sur le point d'accéder à un nouveau marché pour elle, celui du parachutisme sportif et militaire.

3.2 Les activités actuelles

a Produits propres

PARAPENTE

En janvier 1998, un parapente biplace, le STROMBOLI, est entré en phase de commercialisation. 160 unités ont déjà été vendues à ce jour et les ventes de ce produit devraient se poursuivre pour cette fin d'année.

Une voile intermédiaire s'est vue commercialisée en 1998, l'ESPADE. Cette aile, vendue à une centaine exemplaires devrait se voir remplacée par une nouvelle gamme issue d'une évolution de celle-ci.

Une gamme d'ailes solo spécifique montagne (allégée), dénommée KENYA, a vu sa commercialisation débuter au printemps 1996. 200 voiles de ce type ont été vendues, et continuent de se vendre en 1999. Une nouvelle aile allégée sera mise prochainement à l'étude afin de remplacer la KENYA.

Une aile spécifique pour pilotes légers (<40 kg) continue de se vendre depuis 1995, mais cela reste une production marginale.

CERF-VOLANT

Depuis 1998, Nervures a lancé sa propre gamme de cerfs-volants et propose aujourd'hui un modèle décliné en quatre tailles (de 2 à 6 m^2). 100 unités ont déjà été vendues dans ce marché nouveau, et les ventes devraient s'accroître durant l'année 2000.

DIVERSIFICATION

Accessoirement, Nervures produit des parachutes freins (drag chut) destinés à faciliter les approches et atterrissages des deltaplanes performants et cette production stable devrait se poursuivre l'année prochaine.

b Conception, transfert de compétences et prestation de services

ADG LINE

Trois modèles de parapentes intermédiaires, constituant la globalité de la gamme ADG, conçus par Nervures, sont en exploitation pour lesquels la rétribution de la société se fait sous forme de redevances et en paiement de cash à la remise du modèle.

ADVENTURE

Nervures a vendu les droits sur un modèle de voilure à la société Adventure, spécialisée dans le paramoteur, et touche, aujourd'hui, des royalties sur chaque modèle vendu par cette société.

MAINTENANCE

Outre ceux de ses produits propres, Nervures le contrôle périodique et la maintenance du parc existant de Gypa-aile et , localement, d'ADG. Elle réalise des réparations mineures, en service de proximité, de matériels d'autres marques.

NEGOCE

Nervures revend des accessoires accompagnant ses produits et à la mise au point desquels elle participe le plus souvent : Sellettes de parapente, parachutes de secours, sacs de parapentes

DIVERS

Nervures intervient ponctuellement dans la formation en aérodynamique et en mécanique de vol pour la fédération et la formation de moniteurs.

Nervures est également impliquée dans le marquage publicitaire sur voiles ou sur banderoles.

Elle fait aussi de la sous-traitance de fabrication pour des cerfs-volants évolués et parapentes d'autres marques qui utilisent le savoir-faire de constructeur de Nervures .

3.3 Le projet de développement

a Domaine militaire

En 1996, dans le cadre d'une mission innovation de la DGA, pilotée par le Centre Aéroporté de Toulouse, Nervures a réalisé une étude portant sur la faisabilité d'un parachute pour des mission dites de « pénétration sous voiles ».

Un complément d'étude est d'ores et déjà programmé, dont le but est d'arriver à la certification du modèle qui, nécessairement, devra s'accompagner d'une qualification de l'entreprise. Un partenariat avec un parachutier anglo-américain a déjà été signé.

b Domaine sportif et civil

Nervures souhaite aborder le secteur d'activité du parachutisme avec la construction de parachutes de hautes performances en plané et en taux de chute, forte de ses compétences et de son savoir-faire dans la conception de parapentes et de voilures gonflables.

4 But du projet

Aujourd'hui, la simulation numérique de phénomènes physiques a pris une place prépondérante dans la plupart des grandes entreprises des secteurs primaire et secondaire (aéronautique, pétrole, automobile, chimie, travaux publics…) où les décisions importantes sont de plus en plus subordonnées à des résultats de modélisation.

Avec l'avènement de la micro-informatique bon marché, la montée en puissance des ordinateurs personnels (PC), l'heure est venue pour les petites et moyennes entreprises de se mettre au diapason et d'utiliser une des méthodes de conception les plus efficaces existant à ce jour.

La conception de parapentes entre dans ce cadre.

C'est donc dans l'optique de cette recherche d'efficacité que s'insère le développement d'un programme de modélisation de parapentes.

Jusqu'ici plusieurs petites applications ont été développées indépendamment, chacune intervenant à une étape de la conception du parapente.

Le but de ce projet est donc de reprendre ces outils de simulation que possède déjà NERVURES, de les enrichir de nouveaux modules de calcul, de les adapter au cas du parapente (profil souple donc déformable, vol à basse vitesse, centre de gravité de l'aéronef très bas…), puis de proposer une interface unique et commune à la simulation en deux ou en trois dimensions d'un profil ou d'une voile complète donnée.

Le programme ainsi écrit, joliment nommé *Hippolyte*, calcule pour différents angles d'incidence et de dérapage, les forces aérodynamiques s'exerçant sur la voilure (2D ou 3D) dans l'hypothèse d'un fluide non visqueux (écoulements laminaires), isotherme et incompressible. Les deux dernières hypothèses sont très largement justifiées aux vitesses où vole un parapente (20 à 60 km/h) ; pour l'hypothèse de l'écoulement laminaire, on peut estimer à 10% l'erreur commise dans les limites du vol ordinaire.

Dans un second temps, *Hippolyte* doit être capable de calculer l'état d'équilibre du parapente complet (voile + pilote + suspentage) en vol stabilisé ; connaissant les résultats de la simulation aérodynamique (2D ou 3D) de l'aile, on cherche à résoudre les équations de la mécanique afin de déterminer l'état d'équilibre du vol. On cherche également à caractériser ce vol au moyen de termes descripteurs quantifiant la qualité du vol plané. Ces descripteurs doivent être déterminés judicieusement et doivent être les plus représentatifs de la performance qu'ils sont censés refléter.

Le programme réalisant tout cela doit être écrit en C++ (d'où le choix de Linux comme système d'exploitation) afin d'être entièrement évolutif. Le choix d'un langage objet permet, en effet, de faire facilement évoluer les objets vers d'autres plus complets et plus réalistes.

L'application elle-même doit se comporter comme un objet indépendant et capable de s'insérer aisément dans une autre programme de niveau supérieur. Ce programme sera, en fait, un gros projet à venir, capable de simuler divers phénomènes intervenant pendant le vol d'un parapente : acquisition de forme lors du gonflage de l'aile, virage, phénomènes transitoires, fermeture …

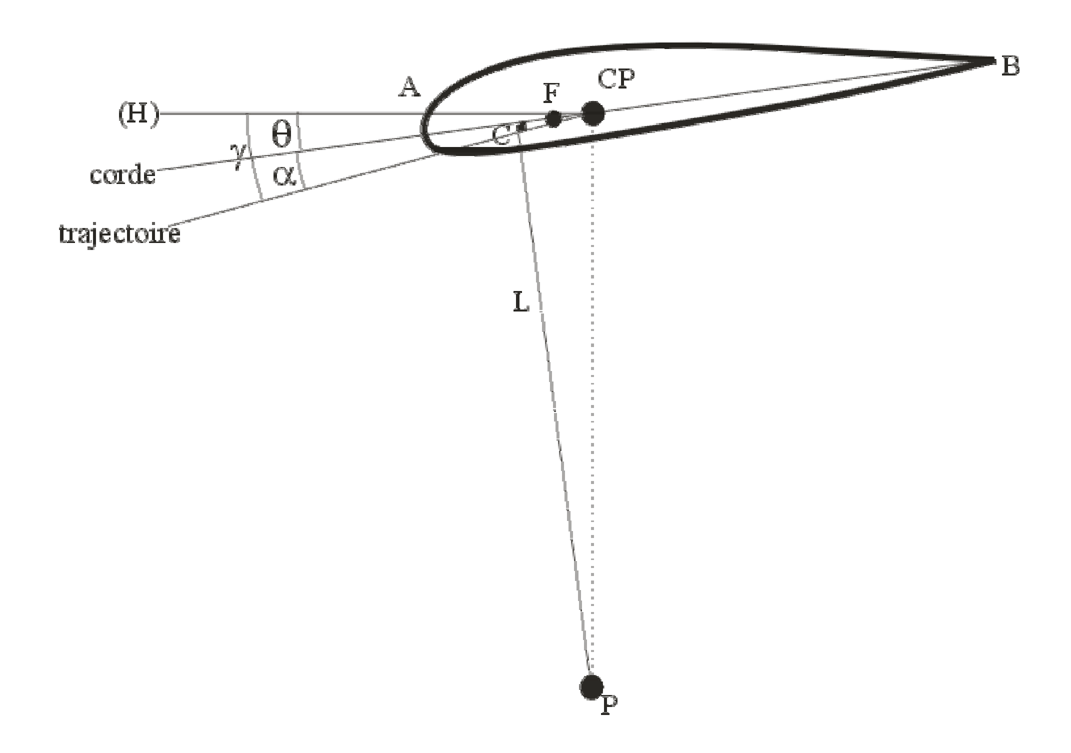
Vient encore après la phase de programmation, la séquence d'expérimentation et de validation des résultats. Tous les parapentes déjà commercialisés par NERVURES durant ces quatre dernières années seront simulés et les résultats comparés aux mesures effectuées en vol. Cela permettra de « régler » le simulateur, puis de tester de nouvelles configurations de parapentes et de profils.

5 Mécanique de vol d'un parapente

5.1 Notations et définitions

5.1.1 Angles et points particuliers

Sur un parapente en vol équilibré (ici vu de profil au niveau de la nervure centrale), on peut situer des angles et des points particuliers utiles à la modélisation et à la compréhension de la mécanique de vol du parapente.



- A est le bord d'attaque.
- B est le bord de fuite.
- P est la position du pilote.

On représente ensuite la *corde* de l'aile : c'est la droite imaginaire reliant le bord d'attaque et le bord de fuite de l'aile. Cette droite représente, en fait, le plan moyen de l'aile.

- C est le *point de calage*. C'est le point d'intersection de la corde centrale et de la perpendiculaire à cette corde menée depuis le pilote. Le calage est entièrement déterminé par le constructeur qui joue sur les longueurs de suspentes pour le faire varier.

Trois angles apparaissent alors, que l'on définit ainsi :

- θ = Assiette : c'est l'angle entre l'horizontale et la corde de l'aile. Cet angle est négatif « vers le bas ». Les parapentes sont, à priori, tous calés négatifs (i.e. : piqueurs).
- γ = Angle de plané : c'est l'angle entre l'horizontale et la trajectoire de l'aile. Par définition, la *finesse* d'un parapente est

$$\varphi = \cot\text{an}\,\gamma \qquad (1)$$

La finesse est un des critères important de performance d'une aile. Cela signifie que l'on cherchera à obtenir un angle de plané le plus petit possible.

- α = Angle d'incidence : c'est l'angle formé par la corde et la trajectoire de l'aile. Cet angle est très important à connaître car c'est sa valeur qui détermine la plupart des autres grandeurs caractérisant le vol. C'est, en fait, l'angle d'attaque des filets d'air sur le profil. Il a de ce fait une importance pour savoir si une configuration est « volable[2] » ou non. En effet, le parapente possédant un profil souple, cet angle ne doit pas devenir trop faible sous peine de fermeture (cf. : descripteurs – vitesse maximum 6.4.1 a).

- CP est le *centre de poussée*. C'est le point d'application des *forces aérodynamiques* sur le profil.
- L est le point d'application de la traînée[3] des suspentes. Ce point, sensiblement au milieu du segment [CP], se situe, sur les voiles plus modernes, au tiers supérieur du suspentage, ce dernier étant beaucoup plus ramifié qu'auparavant (cf. : schéma du suspentage).
- F est le *foyer aérodynamique*[4] du profil.

---

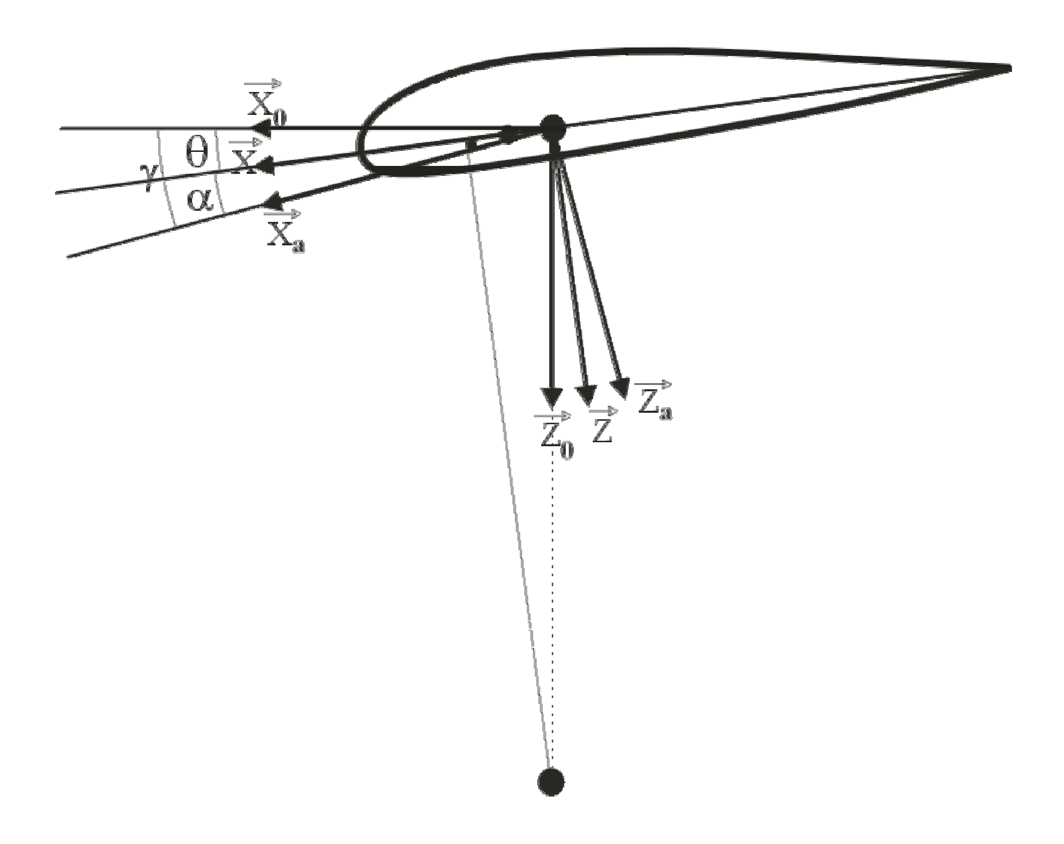
[2] Qui peut voler ! On utilisera ce barbarisme pour dire qu'une configuration amène à un équilibre réaliste où le parapente peut voler.

[3] Cf. : forces aérodynamiques (5.1.3)

[4] Cf. : approximation linéaire, foyer aérodynamique (5.2.1 b)

5.1.2 Repères et formules de changement de repère

L'horizontale, la corde de l'aile et la trajectoire de vol de l'aéronef font apparaître trois référentiels.



On munit classiquement les axes de ces référentiels de vecteurs unitaires, éventuellement indicés par *a* (repère aérodynamique), ou *0* (repère terrestre).

Les trois référentiels ayant la même origine *O*, si M est un point plan vérifiant $\overrightarrow{OM} = \vec{i}x + \vec{k}z = \overrightarrow{i_a}x_a + \overrightarrow{k_a}z_a = \overrightarrow{i_0}x_0 + \overrightarrow{k_0}z_0$, les coordonnées de *M* sont :

$X = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$ dans *R*, $X_a = \begin{pmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{pmatrix}$ dans R_a et $X_0 = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix}$ dans R_0.

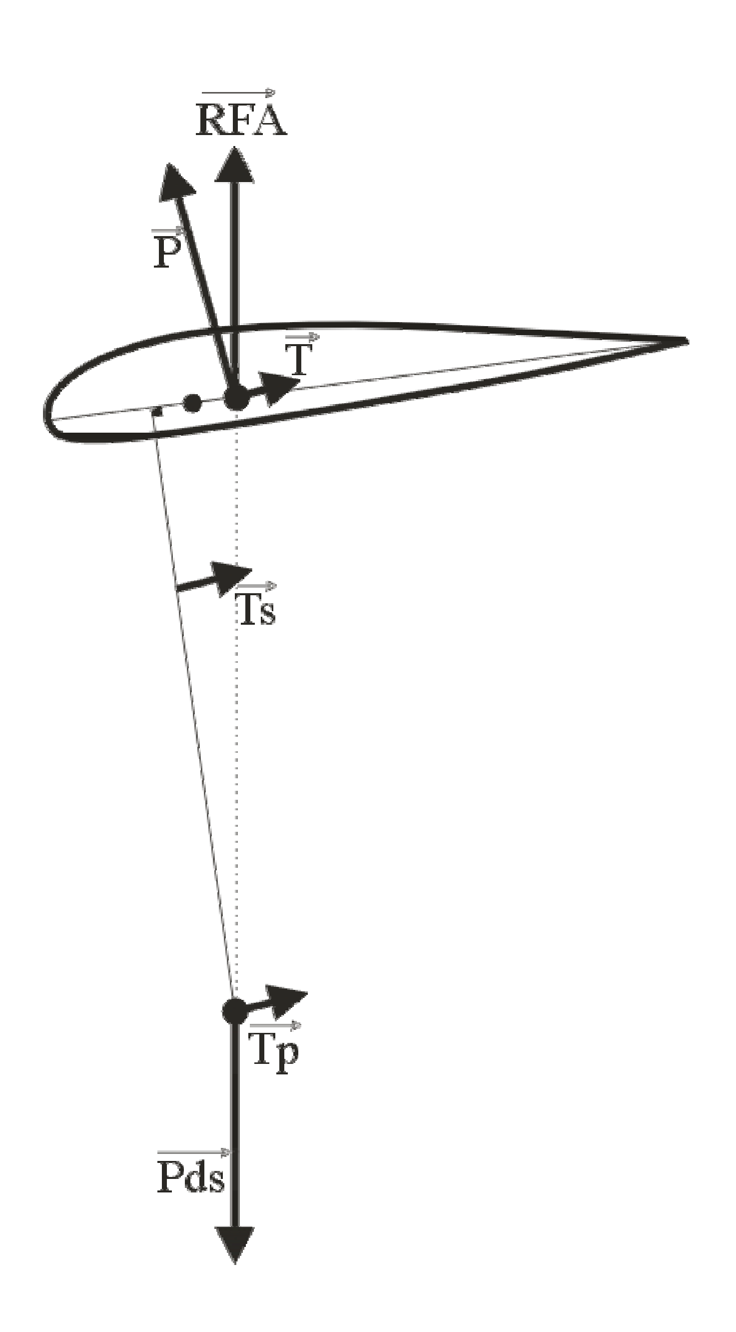
Soit la matrice de rotation $A_\varphi = \begin{pmatrix} \cos\varphi & 0 & \sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{pmatrix}$, alors on a les relations suivantes :

$$\begin{aligned} X &= A_{-\alpha}X_a = A_{-\theta}X_0 \\ X_a &= A_\alpha X = A_\gamma X_0 \\ X_0 &= A_{-\gamma}X_a = A_\theta X \end{aligned} \qquad (2)$$

Si, de plus, on utilise l'approximation des petits angles, on peut écrire :

$$\begin{aligned} &\begin{cases} \vec{i} = \overrightarrow{i_a} - \alpha\overrightarrow{k_a} \\ \vec{k} = \alpha\overrightarrow{i_a} + \overrightarrow{k_a} \end{cases} \quad et \begin{cases} \overrightarrow{i_0} = \overrightarrow{i_a} - \gamma\overrightarrow{k_a} \\ \overrightarrow{k_0} = \gamma\overrightarrow{i_a} + \overrightarrow{k_a} \end{cases} \\ &\begin{cases} \overrightarrow{i_a} = \vec{i} + \alpha\vec{k} \\ \overrightarrow{k_a} = -\alpha\vec{i} + \vec{k} \end{cases} \quad et \begin{cases} \overrightarrow{i_0} = \vec{i} + \theta\vec{k} \\ \overrightarrow{k_0} = -\theta\vec{i} + \vec{k} \end{cases} \\ &\begin{cases} \vec{i} = \overrightarrow{i_0} - \theta\overrightarrow{k_0} \\ \vec{k} = \theta\overrightarrow{i_0} + \overrightarrow{k_0} \end{cases} \quad et \begin{cases} \vec{i_a} = \overrightarrow{i_0} + \gamma\overrightarrow{k_0} \\ \vec{k_a} = -\gamma\overrightarrow{i_0} + \overrightarrow{k_0} \end{cases} \end{aligned} \qquad (3)$$

5.1.3 Forces aérodynamiques



La *Résultante des Forces Aérodynamique* ($\overrightarrow{RFA}$) est la force qui s'oppose directement à la masse du pilote et de la voile. Elle se décompose dans le repère aérodynamique en *portance* ($\vec{P} = X_a$) et en *traînée* ($\vec{T} = Z_a$), et a pour coordonnées : $\overrightarrow{RFA} = \begin{pmatrix} X_a \\ Y_a \\ Z_a \end{pmatrix}$ dans R_a, $\overrightarrow{RFA} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}$ dans R_0 et $\overrightarrow{RFA} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$ dans R.

Dans l'étude longitudinale, on aura toujours $Y = Y_a = Y_0 = 0$.

La traînée de la voile ($\vec{T}$), comme la traînée en général, est une force qui s'oppose à l'avancement d'un corps dans l'air. C'est une force de résistance qui s'applique donc parallèlement à la trajectoire et dans le sens opposé du déplacement. Son intensité est fonction de divers paramètres tels que la forme de l'objet (ici le profil de l'aile), sa vitesse de déplacement…

La portance ($\vec{P}$) est la force créée par le profil, perpendiculairement au déplacement. Cette force est due à une dépression formée sur l'extrados du profil et par une surpression à l'intrados. L'intensité de la portance dépend également de la vitesse de l'écoulement autour du profil et de divers coefficients caractérisant le profil (cf. : coefficients aérodynamiques (5.1.4)).

La masse du pilote $m_p\vec{g}$.

La traînée du pilote $\overrightarrow{t_p}$ appliquée au point P.

La traînée des suspentes $\overrightarrow{t_s}$ qui s'applique au point L.

Il est entendu que pour que le vol équilibré puisse exister, la $\overrightarrow{RFA}$ doit toujours s'opposer au poids du pilote. Afin d'obtenir la meilleure finesse possible, il convient de réduire au maximum la traînée, et que la portance assure la majeure partie de la $\overrightarrow{RFA}$.

5.1.4 Coefficients aérodynamiques

- C_z : portance de l'aile
- C_y : tension en envergure de l'aile (inutilisé car l'aile est symétrique lors du vol droit)
- C_x ou C_{xT} : traînée totale qui se décompose en :
  - C_{xp} : traînée du pilote
  - C_{xs} : traînée des suspentes
  - C_{xa} : traînée de l'aile seule, elle-même se décomposant en C_{x0a} (traînée de forme et de frottement de l'aile) et en C_{xi} (traînée induite).

Dans certains cas, en particulier lorsqu'on ne parle que de profil, C_x peut désigner la traînée du profil seul, le contexte indiquant sans ambiguïté la signification du coefficient.

5.1.5 Autres notations

- S désigne la surface de la voilure qui servira de surface de référence.
- l est la corde moyenne
- b est l'envergure de la voile. $\overline{b} = \frac{b}{l}$
- $s = \left|\overrightarrow{CP}\right|$ est la longueur du cône de suspentage.
- $\sigma = \left|\overrightarrow{AC}\right|$ désigne le calage de l'aile. $\overline{\sigma} = \frac{\sigma}{l}$
- $\delta = \left|\overrightarrow{A\,CP}\right|$ est la position du centre de poussée sur la corde. $\overline{\delta} = \frac{\delta}{l}$
- q_0 est la pression dynamique

$$q_0 = \tfrac{1}{2}\rho S V_\infty^2 \qquad (4)$$

où ρ est la masse volumique de l'air

- f est la position du foyer aérodynamique sur la corde. $\overline{f} = \frac{f}{l}$
- L'*allongement* de la voile, noté λ, est défini par

$$\lambda = \frac{b^2}{S} = \overline{b} \qquad (5)$$

5.2 Coefficients aérodynamiques en 2D et en 3D

5.2.1 Caractéristiques d'un profil (2D)

a Le torseur $\overrightarrow{RFA}$, les coefficients aérodynamiques, le centre de poussée

Pour une incidence α donnée, le torseur des forces aérodynamiques agissant sur un profil d'allongement infini (donc en 2 dimensions) est caractérisé par un coefficient de portance C_z , un coefficient de traînée C_x et un coefficient de moment C_m.

Dans le repère aérodynamique (R_a), la résultante des forces aérodynamiques a pour expression $\overrightarrow{RFA} = -q_0\left(\vec{i}_a C_x + \vec{k}_a C_z\right)$, et son moment, que l'on prend par convention par rapport au bord d'attaque, est $M_A\left(\overrightarrow{RFA}\right) = -q_0 l C_m = -q_0 \delta\left(C_z \cos\alpha + C_x \sin\alpha\right)$, ce qui donne la position du centre de poussée :

$$\bar{\delta} = \tfrac{\delta}{l} = \frac{C_m}{C_z \cos\alpha + C_x \sin\alpha} \qquad (6)$$

L'approximation des petits angles et l'ordre de grandeur $\alpha C_x << C_z$ permet une simplification de cette écriture et l'on retiendra :

$$\bar{\delta} \approx \frac{C_m}{C_z} \qquad (7)$$

b L'approximation linéaire, foyer aérodynamique

Pour des incidences modérées, loin du *décrochage*[5], les expériences réalisées sur les ailes d'avions montrent que dans une plage d'incidence de 0 à 20 degrés environ, les fonctions $C_m(\alpha)$ *et* $C_z(\alpha)$ sont linéaires ce que l'on écrit sous la forme

$$\begin{aligned} C_z(\alpha) &= C_{z\alpha}(\alpha - \alpha_0) \\ C_m(\alpha) &= C_{m0} + C_{m\alpha}(\alpha - \alpha_0) \end{aligned} \qquad (8)$$

[5] décrochage : perte brutale de portance due à une rupture de l'écoulement autour du profil. Le décrochage intervient lorsque l'incidence de vol augmente au delà d'une quinzaine de degrés, si bien que les filet d'air n'arrivent plus à contourner le profil.

Dans cette écriture, α_0 est l'incidence de portance nulle et C_{m0} le moment correspondant à cette incidence. C_{m0} caractérise en partie la stabilité d'un profil ; il peut sembler paradoxal que pour une portance nulle, le moment soit non nul, mais cela montre simplement que le centre de poussée est rejeté à l'infini pour cette incidence, comme le montre (7). Si l'on considère une variation $\Delta\alpha$ d'incidence, les variations correspondantes des coefficients de moment et de portance sont $\Delta C_m = C_{m\alpha}\Delta\alpha$ et $\Delta C_z = C_{z\alpha}\Delta\alpha$. La quantité $\Delta C_m / \Delta C_z$ représente le point d'application de la variation de portance, d'après (7). Or cette quantité ne dépend pas de l'incidence. C'est par définition la position du *foyer aérodynamique* qui est, sur la plupart des profils, situé au quart avant de la corde.

Le foyer aérodynamique est donc un point fixe sur le profil, point d'application des ***variations*** *de portance dont la position, f, sur la corde est définie par*

$$\bar{f} = \frac{f}{l} = \frac{C_{m\alpha}}{C_{z\alpha}} \approx 0.25 \qquad (9)$$

Avec (8), on obtient la formule du coefficient de moment :

$$C_m(\alpha) = C_{m0} + \bar{f} C_z(\alpha) \qquad (10)$$

Pour un parapente en vol, on parle de *centrage avant* si le centre de poussée est en avant du foyer, et d'un *centrage arrière* si le centre de poussée est en arrière du foyer. Il est probable que sur un parapente, en aérologie turbulente (beaucoup de variations d'incidence), un centrage avant permet une meilleure *pénétration* et une meilleure finesse (refus d'entrer dans les descendances, attirance pour les ascendances). En effet, si le centrage est avant, l'effet d'une rafale dirigée du bas vers le haut (entrée dans une ascendance) est un recul du centre de poussée et donc une réaction à piquer de l'aile afin de réaligner le centre de poussée et le centre de gravité du système (sensiblement au niveau du pilote) ; le parapente semble donc attiré par le noyau du thermique[6]. Pour un parapente centré arrière, l'effet d'une rafale de dessous, est, au contraire, une avancée du centre de poussée et une réaction à cabrer la voilure qui semble refuser l'entrée en thermique.

Les profils creux sont plutôt à centrage arrière, les profils plats plutôt à centrage avant.

Stabilité mécanique – En mécanique de vol classique (avions) , il est connu que le foyer est la limite arrière de centrage : l'appareil complet en vol équilibré possède un centre de gravité G et un foyer aérodynamique F. Une augmentation $d\alpha$ de l'incidence induit une variation $\overrightarrow{dR} = -\overrightarrow{i_a} dC_x - \overrightarrow{k_a} dC_z$ de la $\overrightarrow{RFA}$, s'appliquant au foyer. Si le foyer se trouve en avant du centre de gravité, cette variation se traduit par une tendance à cabrer de l'appareil, augmentant ainsi l'incidence, et l'équilibre est instable. Il s'agit d'un *décrochage mécanique*. Si par contre, F se trouve en arrière de G, la variation de $\overrightarrow{RFA}$ produit un couple à piquer, une diminution d'incidence, et l'équilibre est stable.

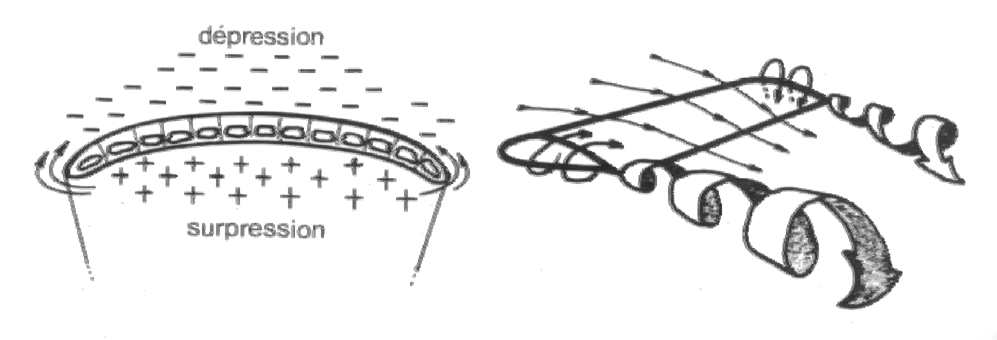
Pour un parapente, on peut mener un raisonnement analogue, compliqué par la longueur du suspentage.

[6] ascendance thermique : colonne d'air plus chaude que l'air ambiant, qui monte.

c Traînée induite

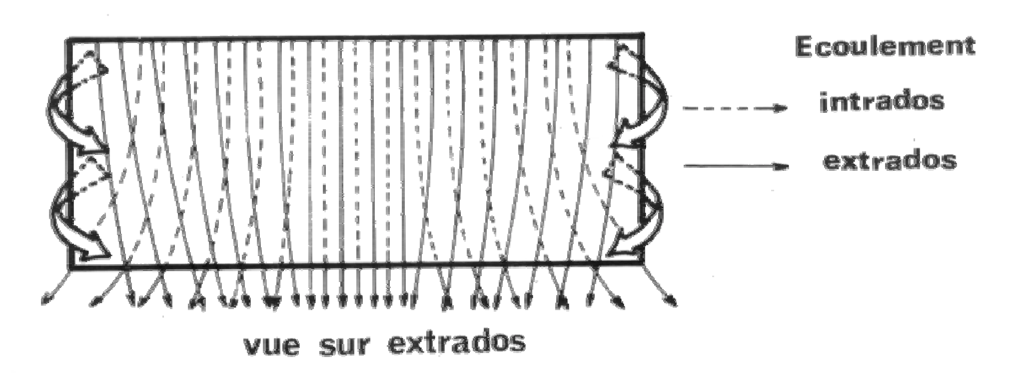
Le problème du coefficient de traînée est délicat. On admet que pour un profil donné, d'allongement infini (2D), ce coefficient est constant et dû aux frottements et à la forme du profil. Il est noté C_{x0a}. Nous en parlerons plus loin, dans l'étude de l'équilibre en tangage.

Pour une aile d'allongement fini λ, en vol à l'incidence α, la pression sur l'extrados étant plus faible que sur l'intrados, l'air contourne les bouts d'aile, ce qui engendre des tourbillons marginaux[7] derrière l'aile et, de ce fait, un surplus de traînée. Cette traînée est appelée la *traînée induite*, et est la principale cause de traînée sur un parapente vu la vitesse de déplacement de celui-ci. Les stabilisateurs sur un parapente sont destinés à réduire le phénomène de contournement, et donc la traînée induite.



Les tourbillons marginaux ne sont pas seulement présents en bout d'aile, mais aussi sur tout le bord de fuite.

La surpression d'intrados à tendance à faire diverger les filets d'air vers l'extérieur tandis que la dépression d'extrados les fait converger vers la nervure centrale. Le décalage ainsi créé en bord de fuite devra donc se résorber, d'où l'apparition de vortex tout le long du bord de fuite.



[7] Ces même tourbillons marginaux sont bien matérialisés (et bien plus connus) à l'arrière des F1 ou des avions de chasse. En effet, ces appareils étant plus rapides, la dépression causée par les tourbillons est assez importante pour faire condenser la vapeur d'eau et les rendre visibles. Ils sont également appelés *vortex*.

Cette forme de traînée constitue donc un effet purement 3D et devra être prise en compte pour corriger le modèle 2D. On a

$$C_{xi} = \frac{C_z^2(\alpha)}{\pi\lambda} \tag{11}$$

Dans la réalité, le coefficient de traînée induite est donnée par

$$C_{xi} = \frac{C_z^2(\alpha)}{\pi\lambda e} \tag{12}$$

Le facteur *e* est appelé *facteur d'efficacité d'Oswald*, et prend en compte une partie de la traînée de profil qui, elle aussi, est proportionnelle à C_z . Ce coefficient d'Oswald est de l'ordre de 0.9.

d Les coefficients en fluides visqueux

Dans la réalité, les coefficients de C_x , C_z et C_m n'ont pas un comportement linéaire par rapport à l'incidence. Une étude des année 30 et 40, développée par la NACA[8], sur les profils NACA à quatre chiffres a mis en évidence qu'au delà d'une certaine incidence (qui dépend du nombre de Reynolds[9]), intervient le décrochage du profil et une brutale perte de portance. Le *coefficient de portance maximum* pour un profil est noté C_{zmax}, et on trouve dans [McCormick], une formule empirique concernant le C_{zmax} des profil NACA à quatre chiffres, pour $\Re e = 8 \times 10^6$

$$C_{z\max} = 1.67 + 7.8pz - 2.6\frac{(0.123 + 0.022p - 0.5z - t)^2}{t^{3/2}} \tag{13}$$

Dans cette équation, *t* est l'épaisseur, *z* et *p* la cambrure maximum du profil et sa position, exprimées en fraction de corde.

5.2.2 Aérodynamique en 3 dimensions

La considération du profil seul n'est pas suffisante pour caractériser totalement les comportements d'une voile de parapente. La prise en compte de paramètres comme le lobe, l'allongement, l'effilement, la forme en plan… sont bien sûr de la plus haute importance pour y parvenir. Le développement d'un tel logiciel est une chose ardue, même lorsqu'on se restreint au cas de fluides non visqueux. Le logiciel PMARC, utilisé ici, a été développé à

[8] NACA : National Advisory Comitee for Aeronautics, prédécesseur de la NASA.
[9] Cf. : Equilibre longitudinal

la NASA dans les années 90 et permet la simulation d'une voile en fluide non visqueux et incompressible. Il fournit non seulement les mêmes coefficients que le modèle 2D (C_m, C_z …) mais aussi les coefficients de lacet (C_l), de roulis (C_n), de tension en envergure (C_y)…

6 L'équilibre longitudinal

6.1 L'équilibre en tangage

Le calcul de l'équilibre longitudinal (équilibre en tangage) consiste en l'étude du vol stabilisé du parapente complet. Connaissant les caractéristiques aérodynamiques du profil, soit par des méthodes de simulation 2D soit par du 3D, il reste à placer un pilote ayant ses caractéristiques propres (masse, C_x …) et un suspentage sous la voilure, puis à résoudre les équations de bilan des forces et des moments. Ces équations, rendues plus complexes par l'éloignement relatif du centre de gravité du système de la voilure, permettent de calculer les paramètres du vol équilibré (incidence, vitesse, finesse…) pour une gamme de calages donnée, en fonction des choix de construction du concepteur.

6.2 Les paramètres contrôlables

La conception de parapente est complexe. De nombreux paramètres entrent en ligne de compte sur le comportement final de l'aéronef souple.

Tout d'abord, le choix d'un profil est déterminant. Le concepteur peut faire varier le *cambrure* du profil, son *épaisseur relative* ou la *position de l'épaisseur maximale*. En 3 dimensions, les variantes peuvent porter également sur la *forme en plan* de l'aile, le *lobe*, l'*effilement*, le *vrillage* ou encore la *loi de profil*.

Ensuite, la *position des ouvertures* en bord d'attaque peut être contrôlée et amener à des différences de comportement. L'*allongement* est également un facteur important dans la conception d'une aile. Nous verrons plus loin que ce terme a une grande influence sur la qualité du vol. Bien sûr, la *surface de la voile* est déterminante.

A tous ces paramètres en relation directe avec la voilure, le concepteur de parapente peut également agir sur la *longueur* du cône de suspentage, ou encore sur le *diamètre* des suspentes qui engendrera des différences de traînée notoires.

La *masse* du pilote placé sous la voile intervient dans les équations bilan, ainsi que le *calage* de l'aile. Le choix d'un calage est d'ailleurs un exercice délicat car il peut tout changer sur un parapente. De très bons choix de géométrie de voilures peuvent être annihilés par un mauvais calage du parapente. C'est pourquoi il convient, lors de simulations numériques, de tester toute une série de calages et de déterminer, pour une configuration donnée, le meilleur calage au vu de termes descripteurs du vol (cf. : les descripteurs pertinents – 6.4)

6.3 Bilan des forces

6.3.1 Les forces en présence

On se place dans le repère aérodynamique (R_a) d'origine le bord d'attaque. Les forces extérieures agissant sur le système *aile + pilote + suspentes* sont :

- Masse aile + suspentes (sans l'air contenu dans la voile qui est équilibré par la poussée d'Archimède). $m_a \vec{g} = m_a g(\overrightarrow{i_a} \sin\gamma + \overrightarrow{k_a} \cos\gamma)$ soit environ 1 à 5% du poids total en vol. On considère que cette force s'applique au point G_a situé au tiers avant de la corde : $\overrightarrow{AG_a} = \frac{l}{3}(-\overrightarrow{i_a} \cos\alpha + \overrightarrow{k_a} \sin\alpha)$
- Résultante des forces aérodynamiques ($\overrightarrow{RFA}$) agissant sur la voilure seule : $\overrightarrow{RFA} = -q_0(\overrightarrow{i_a} C_{xa} + \overrightarrow{k_a} C_z)$ qui s'applique au centre de poussée tel que $\overrightarrow{A\,CP} = \delta(-\overrightarrow{i_a} \cos\alpha + \overrightarrow{k_a} \sin\alpha)$. Le coefficient de traînée C_x est la somme des coefficients de traînée induite C_{xi} et de traînée de forme de l'aile C_{x0a}.
- La traînée des suspentes $\overrightarrow{t_s} = -q_0 C_{xs} \overrightarrow{i_a}$ qui s'applique en L vérifiant $\overrightarrow{AL} = \overrightarrow{AC} + \overrightarrow{CL} = \overrightarrow{i_a}(\sigma\cos\alpha + \frac{s}{2}\sin\alpha) + \overrightarrow{k_a}(\sigma\sin\alpha + \frac{s}{2}\cos\alpha)$
- La masse du pilote $m_p \vec{g} = m_p g(\overrightarrow{i_a} \sin\gamma + \overrightarrow{k_a} \cos\gamma)$ qui s'applique au point P
- La traînée du pilote $\overrightarrow{t_p} = -q_0 C_{xp} \overrightarrow{i_a}$ qui s'applique au point P dont les coordonnées dans R_a sont données par :

$$\overrightarrow{AP} = \overrightarrow{AC} + \overrightarrow{CP} = \overrightarrow{i_a}(\sigma\cos\alpha + s\sin\alpha) + \overrightarrow{k_a}(\sigma\sin\alpha + s\cos\alpha)$$

6.3.2 Equation d'équilibre

La somme des vecteurs forces est nulle à l'équilibre :

$$\begin{aligned} mg\sin\gamma - q_0 C_{xT} &= 0 \\ mg\cos\gamma - q_0 C_z &= 0 \end{aligned} \qquad (14)$$

où m est la somme des masses de la voile, du pilote et des suspentes et C_{xT} la somme des coefficients de traînée ($C_{xT} = C_{xi} + C_{x0a} + C_{xp} + C_{xs}$).

On en déduit, d'après (1), une autre expression de la finesse

$$\varphi = \frac{C_z}{C_{xT}} \qquad (15)$$

6.3.3 Equation des moments

Toujours dans le repère aérodynamique , à l'équilibre, la somme des moments (en tout points) des forces extérieures agissant sur le système est nul, ce qui s'écrit $M_A(\overrightarrow{RFA}) + M_A(\overrightarrow{t_s}) + M_A(\overrightarrow{t_p}) + M_A(m\vec{g}) = 0$.

Evaluons ces différents moments par rapport au bord d'attaque A. On écrit alors $M_A(\vec{\phi}) = \overrightarrow{AP} \wedge \vec{\phi}$, P étant le point d'application de $\vec{\phi}$.

- $M_A(\overrightarrow{RFA}) = -q_0\delta(C_z \cos\alpha + C_{xa} \sin\alpha) \approx -q_0 l C_m$ est directement fourni par la connaissance du coefficient C_m.
- $M_A(\overrightarrow{t_s}) = -q_0 C_{xs}(\sigma \sin\alpha + \frac{s}{3}\cos\alpha)$
- $M_A(\overrightarrow{t_p}) = -q_0 C_{xp}(\sigma \sin\alpha + s\cos\alpha)$
- $M_A(m_p\vec{g}) = m_p(\sigma\cos\theta - \sin\theta)$
- $M_A(m_a\vec{g}) = m_a g \frac{l}{3}\cos\theta$

On vérifie sur le schéma des forces aérodynamiques (5.1.3) que les trois premiers moments sont à piquer et les deux autres à cabrer. Finalement, l'équation des moments s'écrit :

$$\begin{aligned} -q_0\left[lC_m + C_{xp}(\sigma\sin\alpha + s\cos\alpha) + C_{xs}(\sigma\sin\alpha + \tfrac{s}{3}\cos\alpha)\right] \\ - m_p g(s\sin\theta - \sigma\cos\theta) + m_a g\tfrac{l}{3}\cos\theta = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

En résumé, nous avons un système de trois équations ((15) et (16)) à trois inconnues à résoudre, où les inconnues sont q_0 (la vitesse), α (l'incidence) et γ (la finesse).

6.4 Simplification et résolution

$$(15) \Rightarrow \begin{cases} \gamma = \gamma(\alpha) = \arctan\left[\dfrac{C_{xT}(\alpha)}{C_z(\alpha)}\right] \\ q_0 = q_0(\alpha) = \dfrac{mg\cos\gamma(\alpha)}{C_z(\alpha)} \end{cases} \quad (17)$$

On cherche maintenant à résoudre le problème suivant :

« Trouver α tel que (16) »

avec la relation $\theta = \gamma - \alpha$

6.5 Les descripteurs pertinents

Le but du simulateur étant de mettre en avant les caractéristiques du parapente, celui-ci doit fournir des résultats permettant de décrire la qualité du vol plané simulé. Les descripteurs retenus comme significatifs du comportement futur de l'aile sont la vitesse, la position du centre de poussée, la finesse, le taux de chute, l'incidence de vol ainsi que diverses quantités dérivant des précédentes. Tous ces descripteurs auront une importance variable en fonction du type d'aile souhaité : les termes de vitesse maximum et de finesse seront prépondérant pour une aile de compétition, alors que pour des voiles destinées à des parapentistes débutants, les termes de plage de vitesse et d'incidence prendront le pas sur les autres.

Tous les descripteurs sont envisagés comme des fonctions du calage.

En première approximation, on estime que le calage d'une aile peut également être modifié en vol à l'aide de l'*accélérateur*[10]. Ainsi, une variation négative du calage correspond au pilote qui accélère.

Nous modéliserons une atmosphère turbulente ou/et des entrées ou sorties de thermiques par des variations d'incidence et de vitesse.

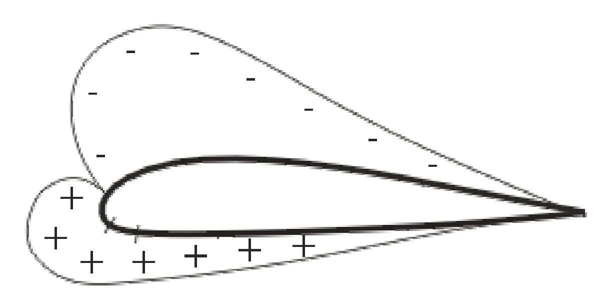
6.5.1 Descripteurs liés à la vitesse

La vitesse, la plage de vitesse, la vitesse maximum et la vitesse minimum de vol sont, bien entendu, des descripteurs importants du vol du parapente.

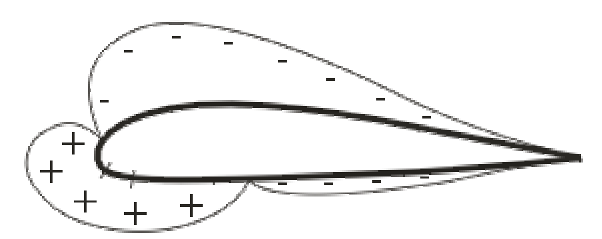
a La vitesse maximum, fermeture frontale

La vitesse maximum du parapente correspond à l'apparition de la fermeture frontale. Dans ce travail, nous avons fait l'analyse suivante : à forte incidence, toute la partie avant de l'intrados est en surpression. Lorsque l'incidence diminue, arrive le moment où l'intrados, dans sa partie avant, est le siège d'une petite dépression. Au fur et à mesure que l'incidence diminue, cette dépression augmente et se rapproche des ouvertures des caissons. On estime que la fermeture intervient lorsque cette dépression atteint les ouvertures. A ce moment, il y a aspiration de l'air contenu dans la voilure, puis déformation du profil jusqu'à la fermeture. Certaines voile présentent un autre type de fermetures frontales : la dépression d'intrados devient massive avant d'avoir touché les ouvertures, et dans ce cas, la fermeture est plus rare mais plus massive et violente, sans la phase de vidage des caissons.

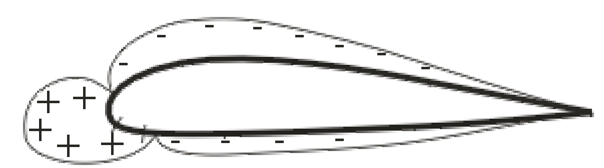
[10] accélérateur : système de modification du calage de l'aile par modification du profil lui donnant une tendance à piquer.



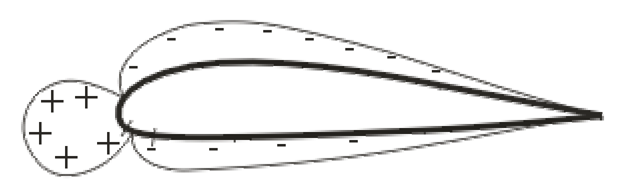
incidence 8°, vol normal ; dépression en extrados, surpression en intrados



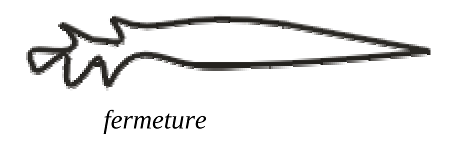
incidence 5° ; l'intrados commence à être déporteur



incidence 3° ; la dépression s'approche des ouvertures de caissons



incidence 1° ; la dépression est dans les ouvertures et aspire l'air contenu dans la voile : début de la fermeture



fermeture

Une vitesse maximum élevée sera un critère à retenir pour la conception d'ailes de compétition

b La vitesse minimum, décrochage

On admet que la vitesse minimale d'un parapente est celle obtenue lorsque la voile commence à décrocher. Cette limite est donnée pour un profil (2D) par (13) valable pour les profils NACA à quatre chiffres. Malheureusement, nous ne disposons pas à notre connaissance de formule empirique de ce style prenant en compte le rayon de bord d'attaque que l'on sait déterminant pour l'incidence maximum.

c La plage de vitesse $\Delta V = V_{\max} - V_{\min}$

Bien sûr, plus elle est étendue, plus le parapente est tolérant aux conditions aérologiques turbulentes. L'obtention de bonnes plages de vitesse est un challenge pour l'avenir ; les plages de vitesse actuelles moyennes sont de l'ordre de 20 à 25 km/h.

d Aptitude à entrer en thermique

Nous avons choisi pour décrire ce comportement, la variation de vitesse avec l'incidence : $\frac{dV}{d\alpha}$

Une entrée en ascendance thermique est caractérisée par une rafale de vent de dessous, ce qui correspond à une augmentation brutale de l'incidence.

Si $\frac{dV}{d\alpha} < 0$, la voile ralentit en entrée de thermique. C'est typiquement le comportement d'une voile qui refuse le thermique.

A l'inverse, si ce terme est positif la voile aura tendance à accélérer vers la zone ascendante.

e Efficacité de l'accélérateur

La variation de vitesse avec le calage : $\frac{dV}{d\sigma}$ caractérise l'efficacité de l'accélérateur. Si ce terme est grand, une variation faible de calage provoquera une accélération importante. L'accélérateur sera dit *efficace*.

6.5.2 Descripteurs liés à l'incidence

L'incidence n'est pas à proprement parler un indicateur du comportement d'une aile, mais elle permet néanmoins une certaine vérification sur la cohérence des autres résultats fournis par le programme.

Il est à noter, tout de même, que l'incidence de vol doit être, le plus possible, éloignée des incidences limites de décrochage et de fermeture.

6.5.3 Descripteurs liés au centre de poussée

Un centre de poussée qui bouge peu dans le sens de la corde est le garant d'une bonne stabilité en tangage.

Le terme $\frac{d\bar{\delta}}{d\alpha}$ permet de quantifier la stabilité en tangage en atmosphère turbulente : s'il est grand, cela signifie que les variations de la position du centre de poussée sont importantes en turbulences. Si de plus, il est négatif, le centre de poussée aura tendance à avancer lors d'une augmentation d'incidence, entraînant un surplus de cabrage de l'aile et une impression d'instabilité agrandie.

Ce terme est à corréler avec $\frac{dV}{d\alpha}$ pour caractériser le comportement du parapente en entrée de thermique : en effet, s'il est positif, cela aidera d'autant la voile à pénétrer l'ascendance, puisqu'alors celle-ci doit avancer pour retrouver l'équilibre.

6.5.4 Descripteurs liés à la finesse

C'est la caractéristique qui fait le plus frémir les parapentistes en général. Les variations de finesse en fonction du calage, de l'incidence et de la vitesse sont également de bons descripteurs de comportement.

a La finesse maximum potentielle

La finesse du parapente complet est une fonction du C_z :

$$f(C_z) = \frac{C_z}{C_{x0T} + \frac{C_z^2}{\pi\lambda}}$$

où C_{x0T} est la somme des coefficients de traînée de la voile, du pilote et du suspentage, et λ l'allongement. Le maximum de cette fonction est atteint pour $C_z = \sqrt{\pi\lambda C_{x0T}}$ et la finesse maximum que peut atteindre le parapente est

$$f_{\max} = \sqrt{\frac{\pi\lambda}{4C_{x0T}}} \qquad (18)$$

Cette finesse est la finesse maximum potentielle pour un parapente à C_{x0T} et allongement donnés. Cette finesse correspond à une valeur de calage unique, σ_0 et ne sera accessible en vol qu'à condition que $\sigma = \sigma_0$. Il semble qu'en général, ce calage soit très au-delà des valeurs compatibles avec la sécurité (décrochage aérodynamique) et que plus un parapente est calé à plat (σ grand), plus sa finesse est importante.

b Variation de finesse en réponse à une variation d'incidence : $\frac{df}{d\alpha}$

Ce terme permet de quantifier, pour un calage donné la performance en finesse d'une voile dans une atmosphère turbulente.

Si $\frac{df}{d\alpha}$ est grand, les variations de finesses instantanées sont importantes. L'interprétation de cet indicateur est laissée à la discrétion du lecteur.

c Performance de l'accélérateur : $\frac{df}{d\sigma}$

Ce terme permet de quantifier, comme l'indicateur suivant, la performance d'un accélérateur.

S'il est grand, la finesse se dégrade beaucoup avec la diminution du calage : l'accélérateur n'est pas performant

d Performance de l'accélérateur : $\frac{df}{dV}$

Cet indicateur caractérise également la performance de l'accélérateur, et est même plus pertinent que le précédent du fait qu'il tient compte de l'accélération elle-même. Il quantifie la dégradation de finesse en réponse à une certaine accélération.

6.5.5 Descripteurs liés au taux de chute

Le taux de chute (vitesse verticale de descente) est un descripteur pertinent en soi.

7 Hippolyte (v 1.04 – septembre 1999)

7.1 Présentation générale

Hippolyte est un logiciel de simulation de parapentes, écrit pour la société Nervures qui, à cette occasion, s'est dotée d'un nouvel ordinateur – Pentium II à 350 MHz – avec Linux pour système d'exploitation.

Ce logiciel effectue pour une configuration de parapente donnée, une simulation aérodynamique (2D ou 3D) dont les résultats sont exploités par une simulation de l'équilibre mécanique du parapente complet en vol droit.

Il est entièrement écrit en C++, pour permettre de faciles évolutions d'objets vers plus de réalisme et de précision, et aussi afin de pouvoir s'intégrer aisément dans un projet à venir de plus grande ampleur.

Hippolyte possède un script d'installation qui le rend facile à transporter sur une autre machine. Ce script s'occupe de placer les différents composants nécessaires au fonctionnement du logiciel en fonction de votre environnement. Il est doté d'une documentation complète (manuel d'installation, manuel d'utilisation) qui le rend un peu moins barbare à utiliser. Il est également facilement configurable à l'aide d'un fichier contenant tout les paramètres d'initialisation.

Hippolyte possède également une interface graphique qui permet de le mettre en œuvre à l'aide de « clic » de souris.

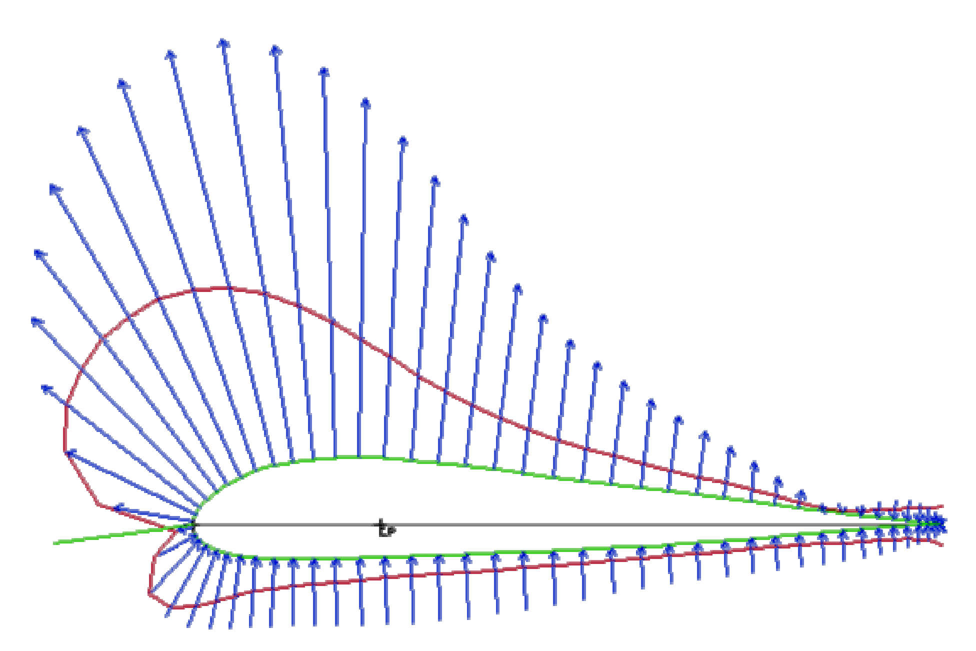
7.2 Les simulateurs aérodynamiques

Les deux méthodes de simulation incluses dans *Hippolyte* sont contenues dans des objets C++ présentant la même interface, héritant tout deux d'un objet virtuel pur. Cette architecture donne l'avantage de pouvoir implémenter l'une ou l'autre des méthodes (2D ou 3D) à l'aide de la même commande.

7.2.1 Simulateur 2D

La simulation en deux dimensions s'appuie sur des méthodes numériques dites « par panels» décrite par [Moran].

Un objet C++, implémentant ce schéma, avait déjà été écrit par Pierre Puiseux, en 1997, et couplé à une interface pour AUTO CAD pour la visualisation des résultats. Cette application est capable de lire une description de profil dans un fichier, d'effectuer des transformations sur ce profil (lissage, normalisation…), puis de simuler l'écoulement pour divers angles d'incidence. Le module de post-traitement sous AUTOCAD est alors capable de représenter les diverses données de sorties (répartitions de pressions autour du profil, vitesses…).



Visualisation des pressions en simulation 2D sous AUTO CAD

On retrouve cette classe aujourd'hui dans *Hippolyte*, sous une forme un peu plus complète. Des fonctions de calcul de géométrie y ont été incluses (calcul de la ligne moyenne d'un profil, par exemple, utile pour la mise en œuvre la formule magique (13)). Une fonction permettant de gérer et d'utiliser la position des ouvertures sur le profil a également été ajoutée.

La simulation fourni pour un profil donnée, les termes suivants :

- α_0 : incidence de portance nulle (interpolée)
- α_{min} : incidence minimale avant fermeture
- C_{m0} : coefficient de moment correspondant à $\alpha=\alpha_0$
- $\bar{f}$: position du foyer aérodynamique
- $C_{z\alpha} = \dfrac{dC_z}{d\alpha}$ qui est supposé constant dans le cas 2D ($C_z(\alpha)$ linéaire)
- $C_{m\alpha} = \dfrac{dC_m}{d\alpha}$ qui est supposé constant dans le cas 2D ($C_m(\alpha)$ linéaire)
- C_{zmax} : coefficient de portance maximum calculé par (13)

… et pour des incidences allant de –5 à 20 degrés (modifiable), les termes suivant :

- C_x : coefficient de traînée
- C_{xi} : coefficient de traînée induite
- C_z :coefficient de portance

- C_m : coefficient de moment
- $\overline{\delta}$: position du centre de poussée

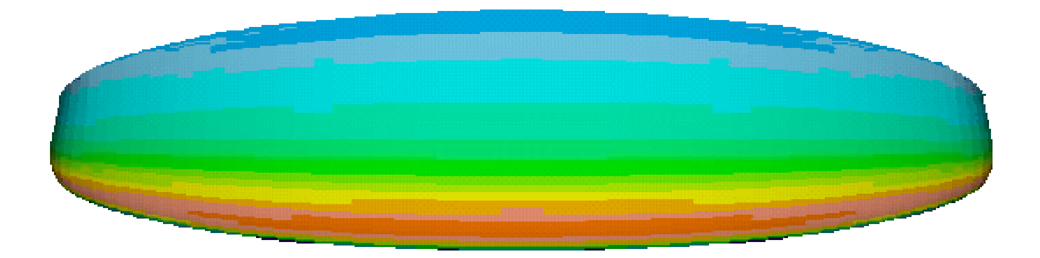
7.2.2 Simulateur 3D

Le principe de fonctionnement du simulateur en trois dimensions est analogue à celui en deux dimensions (« panel method »), mais l'implémentation est beaucoup plus longue et délicate. Le logiciel PMARC, que l'on utilise ici, a été développé dans les années 90 par la NASA et permet la simulation d'une voile en fluide non visqueux et incompressible. Il fournit non seulement les mêmes coefficients aérodynamiques que le simulateur 2D (C_m, C_z…), mais aussi les coefficients de lacet (C_l), de roulis (C_n), de tension en envergure (C_y), ceci pour toute valeur de l'incidence et du dérapage, permettant en particulier l'analyse du virage sur une aile donnée. Ces coefficients seront utilisés plus tard, mais ne sont pas mis en œuvre ici, dans l'étude du vol droit.

Du fait de l'hypothèse simplificatrice du fluide non visqueux, l'accès au coefficient de traînée (C_x) est, comme en 2D, exclus. Cependant, PMARC fournit une évaluation de la traînée induite (C_{xi}) par deux méthodes différentes, plus précises que celles données par les formules du paragraphe 5.2.1 c.

Bien que PMARC soit prévu pour des fluides non visqueux, une subroutine permet de calculer les lignes de courant et de prévoir les points de transition et de décrochage de la couche limite le long de ces lignes de courant.

De même qu'en 2D, divers modules de visualisation ont été développé sous AUTO CAD.



Répartition des pressions sur l'extrados en simulation 3D sous AUTO CAD (le bord d'attaque est en bas)

Les coefficients que fournit le simulateur 3D sont identiques à ceux du simulateur 2D, exceptés $\frac{dC_z}{d\alpha}$ et $\frac{dC_m}{d\alpha}$ qui sont calculés en fonction de l'incidence, et non plus supposés constants.

7.3 Principes et fonctionnement d'Hippolyte

7.3.1 Sessions et valeurs par défaut

Le programme *Hippolyte* permet de travailler par sessions. Une session consiste en l'exécution du programme pour (une ou) plusieurs configurations à comparer. La session porte un nom, disons « Germaine », et *Hippolyte* créé un répertoire « Germaine » dans lequel se trouveront tous les fichiers générés. Le fichier d'entrée de la session est « Germaine.eqi » (eqi = **éq**uilibre **i**nput) et est recopié dans le répertoire de la session. Ce fichier est un fichier de paramètres à disposition de l'utilisateur qui comporte une description de l'ensemble des configurations à simuler lors de la session « Germaine ».

Voici un exemple de fichier de session commenté juste après.

```
NOMBRE DE CONFIG                3
FORMAT DE SORTIE                Netscape

CONFIG1
   REPERTOIRE D'ENTREE          /home/jerome/SIMULATIONS
   FICHIER D'ENTREE             germaine.cot
   CALAGE
      CALAGE MAXI               49
      CALAGE MINI               15
      DELTA CALAGE              1
   PILOTE
      NOM DU PILOTE             Germaine
      MASSE DU PILOTE           110
      SCX DU PILOTE             0.6
      QI DU PILOTE              40
   SUSPENTAGE
      LONGUEUR DU SUSPENTAG     6.2
      DIAMETRE DES SUSPENTES    1.1
      SCX DU SUSPENTAGE         0.5
   VOILE
      NOM DE LA VOILE           Suspentage6.2
      SURFACE DE LA VOILE       31
      ALLONGEMENT               4.4
      MASSE DE LA VOILE         6.5
      AVANT DE L'OUVERTURE      1.1
      ARRIERE DE L'OUVERTURE    2.2
   PARAMETRES NUMERIQUES
      OSWALD                    0.9
      CX0A                      0.02
      G                         9.81
      RHO                       1.112

CONFIG2
   REPERTOIRE D'ENTREE          /home/jerome/SIMULATIONS
   FICHIER D'ENTREE             germaine.cot
   SUSPENTAGE
      LONGUEUR DU SUSPENTAGE    7.2
```

```
   VOILE
      NOM DE LA VOILE         Suspentage7.2

CONFIG3
   REPERTOIRE D'ENTREE        /home/jerome/SIMULATIONS
   FICHIER D'ENTREE           germaine.cot
   SUSPENTAGE
      LONGUEUR DU SUSPENTAGE  8.2
   VOILE
      NOM DE LA VOILE         Suspentage8.2
END
```

On peut remarquer que pour les configurations 2 et 3, toutes les données ne sont pas renseignées. Lorsque c'est le cas, *Hippolyte* affecte aux variables en question, une valeur par défaut. Ces valeurs par défaut sont configurables dans le fichier d'initialisation.

Parcourons le fichier ligne par ligne.

```
NOMBRE DE CONFIG              3
```

Le fichier doit obligatoirement commencer par préciser le nombre de configurations à simuler : en effet, une session de simulation peut simuler plusieurs parapentes totalement différents. Un souci d'organisation et d'exploitation aisé des résultats devra pousser l'utilisateur à regrouper, dans une même session, des configurations plutôt proches.

```
FORMAT DE SORTIE              Netscape
```

Hippolyte donne la possibilité de gérer le format de sortie des données. Deux formats sont disponible pour l'instant : Le format « Netscape » qui crée un fichier de résultats linéaire de telle sorte qu'il soit visualisable par le biais de l'interface graphique ; et le format « Applix » fabrique un fichier d'une certaine forme afin d'être ouvert par un tableur tel qu'Applix.

```
CONFIG1
   REPERTOIRE D'ENTREE        /home/jerome/SIMULATIONS
   FICHIER D'ENTREE           germaine.cot
```

Ces lignes obligatoires représentent respectivement le numéro de la configuration, le répertoire contenant le fichier de description de la voile (2D ou 3D) et le nom du fichier lui-même. *Hippolyte* reconnaît le fichier de description de voilure et détecte automatiquement s'il s'agit d'une simulation en 2D ou en 3D.

```
   CALAGE
      CALAGE MAXI             49
      CALAGE MINI             15
      DELTA CALAGE            1
```

Le calculs se feront pour des calages variant de 'calage mini' à 'calage maxi' par pas de 'delta calage'. Pour chaque calage, seront calculées les caractéristiques du parapente (vitesse, incidence, finesse, taux de chute…).

```
PILOTE
   NOM DU PILOTE           Germaine
   MASSE DU PILOTE         110
   SCX DU PILOTE           0.6
   QI DU PILOTE            40
```

Précision des paramètres concernant le pilote. Le 'SC_x' du pilote est de l'ordre de 0.4 et peut varier de 0.19 à 053 (cf. [Belloc]). Remarquez un paramètre essentiel pour la simulation, le QI du pilote, qui joue un rôle très important ! (>40)

```
SUSPENTAGE
   LONGUEUR DU SUSPENTAGE  6.2
   DIAMETRE DES SUSPENTES  1.1
   SCX DU SUSPENTAGE       0.5
```

Paramètres du suspentage. Pour l'instant, le diamètre des suspentes est inutilisé, mais on peut imaginer faire évoluer cet objet calculant automatiquement le SC_x en fonction de la longueur et du diamètre des suspentes.

```
VOILE
   NOM DE LA VOILE         Suspentage6.2
   SURFACE DE LA VOILE     31
   ALLONGEMENT             4.4
   MASSE DE LA VOILE       6.5
   AVANT DE L'OUVERTURE    1.1
   ARRIERE DE L'OUVERTURE  2.2
```

Paramètres de la voile Les valeurs de surface et d'allongement sont ignorées lors de simulation 3D car elles sont calculées automatiquement. Les valeurs 'AVANT' et 'ARRIERE DE L'OUVERTURE' sont la position (en pourcentage de corde) des ouvertures des caissons. En 3D, la spécification de ces paramètres surchargera les valeurs initialisées par le fichier de description de la voile contenant déjà ces informations.

```
PARAMETRES NUMERIQUES
   OSWALD                  0.9
   CX0A                    0.02
   G                       9.81
   RHO                     1.112
```

La possibilité est également donnée de modifier certaines valeurs numériques :

- 'OSWALD' spécifie une autre valeur que la valeur par défaut pour le facteur d'efficacité d'Oswald. Ce terme est ignoré lors d'une simulation 3D car il constitue purement un terme de correction 2D.
- 'G' et 'RHO' sont respectivement l'accélération de la pesanteur et la masse volumique de l'air. Il est parfois utile de faire varier ces termes afin d'affiner les réglages du simulateur, et que les résultats soient comparables aux mesures effectuées en vol.
- 'CX0A' est le coefficient de traînée irréductible de la voilure (hors traînée induite). Il est supposé constant et ne dépend que de la forme de la voile. Il est utilisé en 2D et en 3D pour pallier à l'hypothèse de non viscosité de l'air.

```
END
```

Ce marqueur de fin n'est plus utilisé sur les dernières versions d'*Hippolyte*.

7.3.2 Les données de sortie

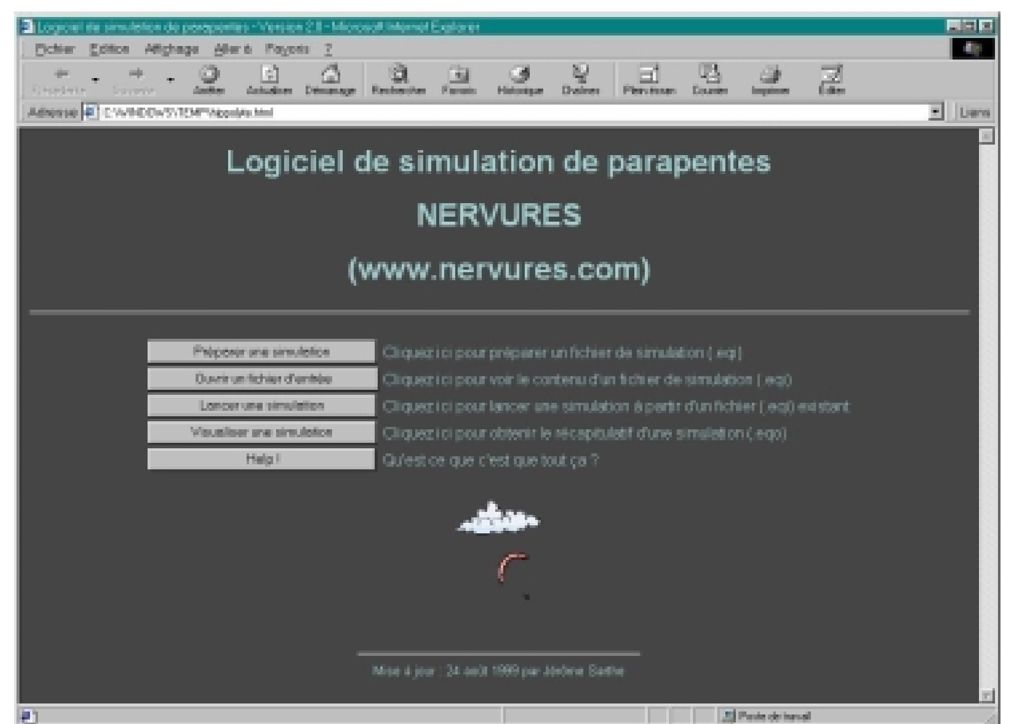
Lorsque le fichier « Germaine.eqi » est passé comme paramètre à *Hippolyte*, celui-ci génère un certain nombre de fichiers dans le répertoire de la session.

On y trouve tout d'abord, un fichier « Germaine.eqo » (**éq**uilibre **o**utput), qui est un fichier de résumé de la session. Il contient, pour chaque configuration, les paramètres de départ ainsi que certains descripteurs du vol des configurations étudiées : caractéristiques aérodynamiques des profils (ou voilure en 3D), bornes de calage (calage minimal volable, et maximum volable) et le calage optimal[11], ainsi que les caractéristiques du parapente à ce calage.

Pour chaque configuration, on retrouve un bilan de chaque calage testé. Ce fichier contient les résultats de la simulation et confirme ou non si ce calage amène à une situation volable

Sont également générés, des fichiers de nombres, peu exploitables directement par l'utilisateur, mais utilisables par les scripts de visualisations des résultats (cf. : scripts gravitant autour d'*Hippolyte* – 7.3.4)

7.3.3 L'interface graphique



Afin de rendre *Hippolyte* plus convivial, une interface graphique en HTML (Hyper Text Markup Language) a été développée. Cette interface propose de créer dynamiquement un fichier d'entrée, de lire un fichier d'entrée existant, de lancer une simulation ou encore de visualiser les résultats d'une session. L'utilisateur remplit des formulaires et clique sur

[11] Le calage optimal est le calage simulé ayant engendré la meilleure *finesse*.

des boutons à l'aide de la souris. Des scripts en Perl (Practical Extraction and Report Language) se chargent d'analyser les données et d'exécuter les commandes selon les choix de l'utilisateur.

Cette interface paraissait indispensable pour l'utilisation d'*Hippolyte* par des concepteurs peu familiers de Linux.

Une aide en ligne est bien sûr proposée, et on y retrouve toutes les rubriques d'aide à l'installation, à l'utilisation ainsi qu'une documentation technique détaillée d'*Hippolyte*.

Actuellement, cette interface est en cours de finition et proposera, dans quelques semaines, des modules de visualisation de courbes de résultats, tels que le font, pour l'instant, les scripts décrits ci-dessous.

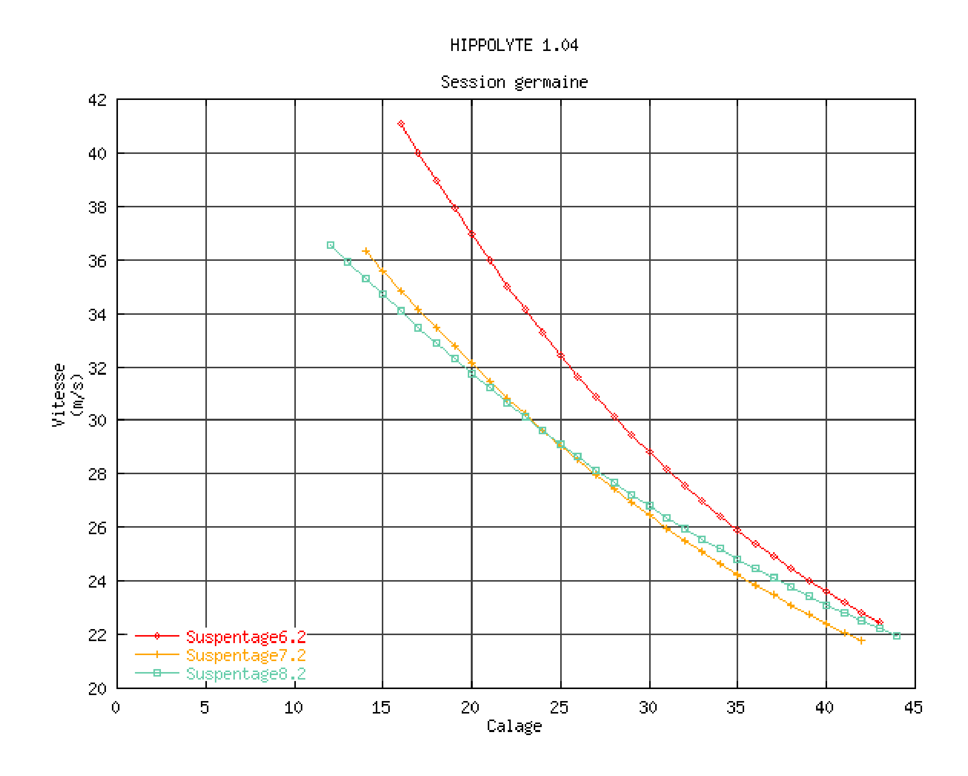
7.3.4 Scripts gravitant autour d'*Hippolyte*

Dans le but de proposer des résultats de simulation éloquents au concepteur, quant à ses choix de conceptions, des scripts Perl ont été ajoutés autour d'*Hippolyte*. Ces scripts utilisent les fichiers de sortie du simulateur et présentent certains paramètres de la simulation.

Le script 'plot' (traçage), implémenté à la manière d'une commande UNIX, présente des courbes de comparaison des différentes configurations d'une même session. Par exemple, la commande

```
plot –V –gif Germaine
```

génère un fichier au format 'gif', de comparaison des courbes de vitesse des trois configurations de la session « Germaine ».



Les formats de fichiers connus par 'plot' sont :

- 'ps' – postscript (couleur ou noir et blanc)
- 'eps' – postscript encapsulé
- 'gif' – GIF CompuServe
- 'cdr' – CorelDraw
- 'dxf' – pour AUTO CAD

Un script mineur, 'profile', permet de dessiner un profil à l'écran ou sous un format de dessin quelconque (gif, dxf, cdr ou postscript)

7.4 Exemples d'utilisation

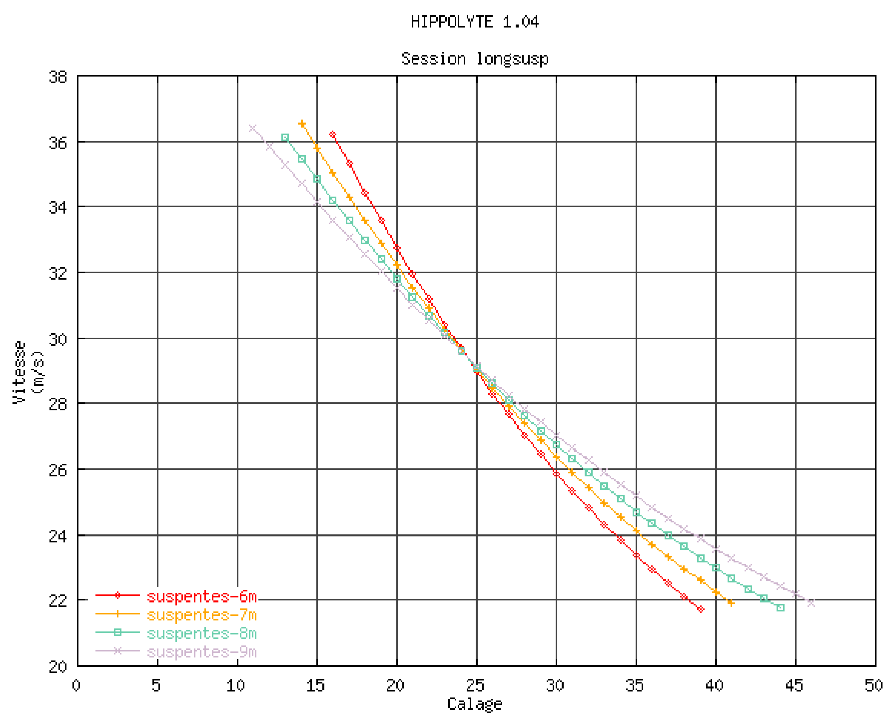
Pour ces exemples d'utilisation, seul un paramètre a été modifié d'une configuration à l'autre, afin de refléter au mieux son influence directe sur le comportement du parapente. Les descripteurs de vitesse, finesse et variation de la position du centre de poussée ont été retenus pour ces exemples.

L'intervalle de définition des courbes tracées par *Hippolyte* est l'intervalle des calages volables.

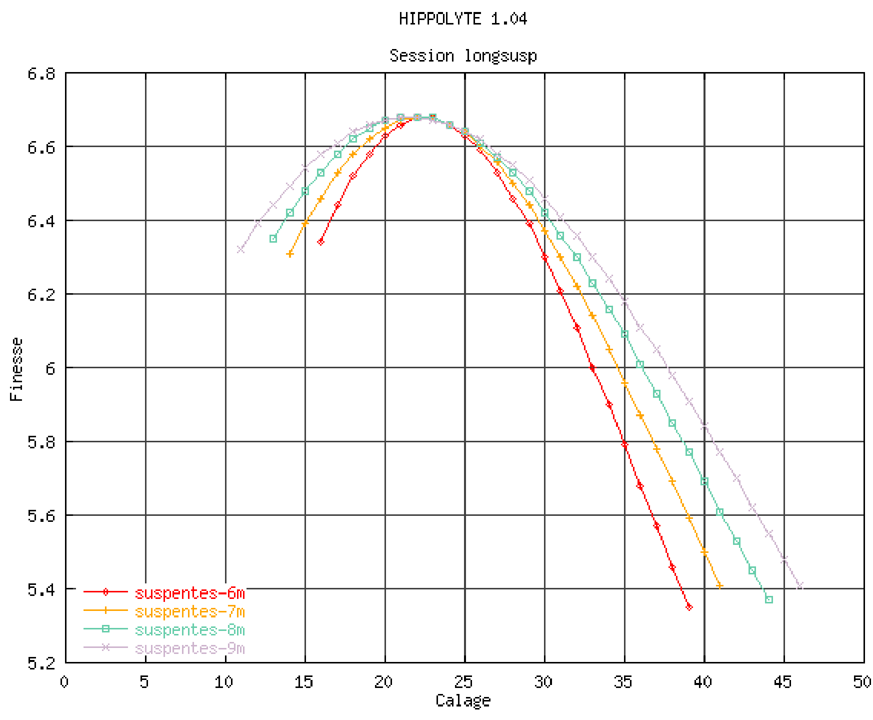
7.4.1 Influence de la longueur des suspentes

Ce premier exemple montre comment la longueur du cône de suspentage influe sur le comportement du parapente.

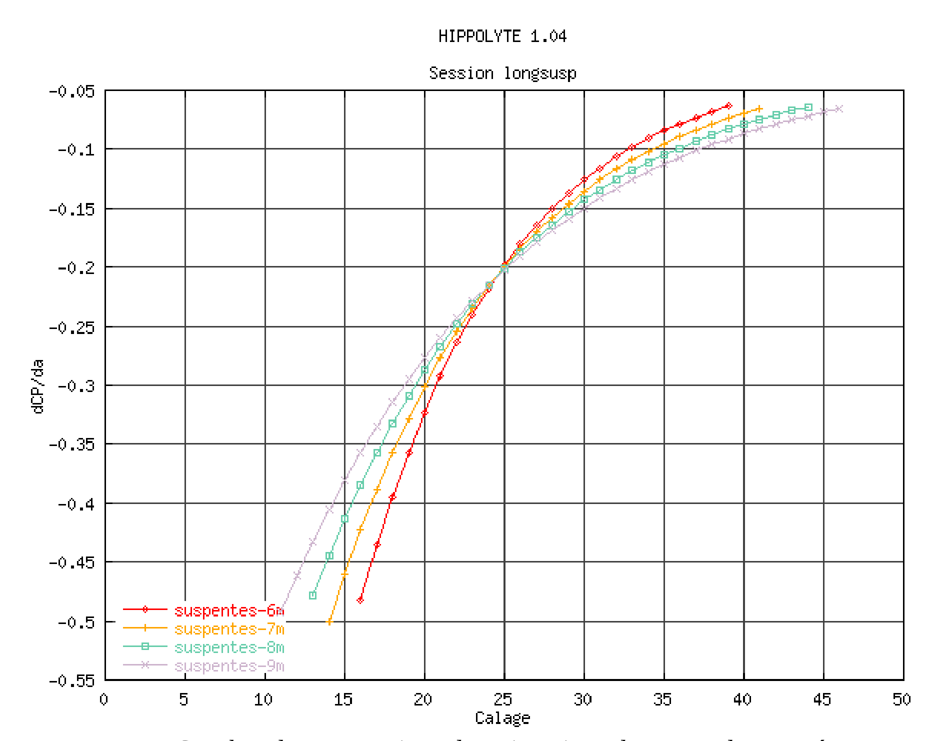
- Configuration 1 : longueur du suspentage = 6 m
- Configuration 2 : longueur du suspentage = 7 m
- Configuration 3 : longueur du suspentage = 8 m
- Configuration 4 : longueur du suspentage = 9 m



Courbes de comparaison des vitesses de vol



Courbes de comparaison des finesses de vol



Courbes de comparaison des migrations du centre de poussée

Ces courbes montrent d'abord que la longueur des suspentes joue un rôle important dans la marge de calage. Un suspentage court engendre une marge faible. Ce qui signifie une plus grande sensibilité à la fermeture lors d'accélérations.

La courbe des vitesses montre que pour les 4 configurations, la vitesse potentielle maximum est la même (environ 36 km/h). En revanche, elle est atteinte à des calages différents. Pour un même calage, le parapente avec les suspentes les plus courtes est plus rapide en deçà d'un certain calage et plus lent au delà ; d'où, une accélération plus efficace.

La courbe des finesses montre simplement que la longueur du suspentage n'influe pas sur le calage optimal et que la meilleure finesse est toujours de l'ordre de 6,7.

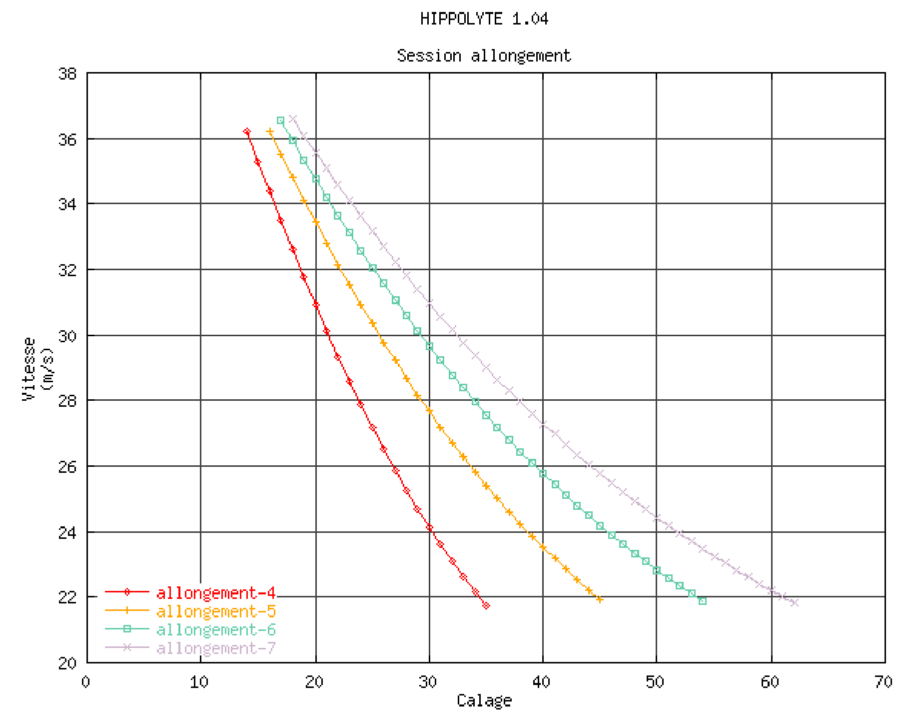
La troisième courbe est également intéressante du fait de l'apparition d'un calage limite (environ 25%) où les courbes se croisent. Si on consulte les fichiers de caractéristiques pour ces parapentes, on s'aperçoit que ce point coïncide avec le foyer aérodynamique de l'aile. On remarque que le profil, seul, est instable (comme la plupart des profils de parapente) car $\frac{d\overline{\delta}}{d\alpha} < 0$ (le centre de poussée avance lorsque l'incidence augmente). Un long cône de suspentage amène à un comportement plus stable dans les calages piqueurs, mais, à l'inverse, il rend le parapente instable dans les calages à plat[12].

On pourrait, à la vue des autres courbes, établir une théorie sur les choix de conception d'un parapente, mais cela fait l'objet d'une étude à part entière qu'il ne convient pas d'entamer ici.

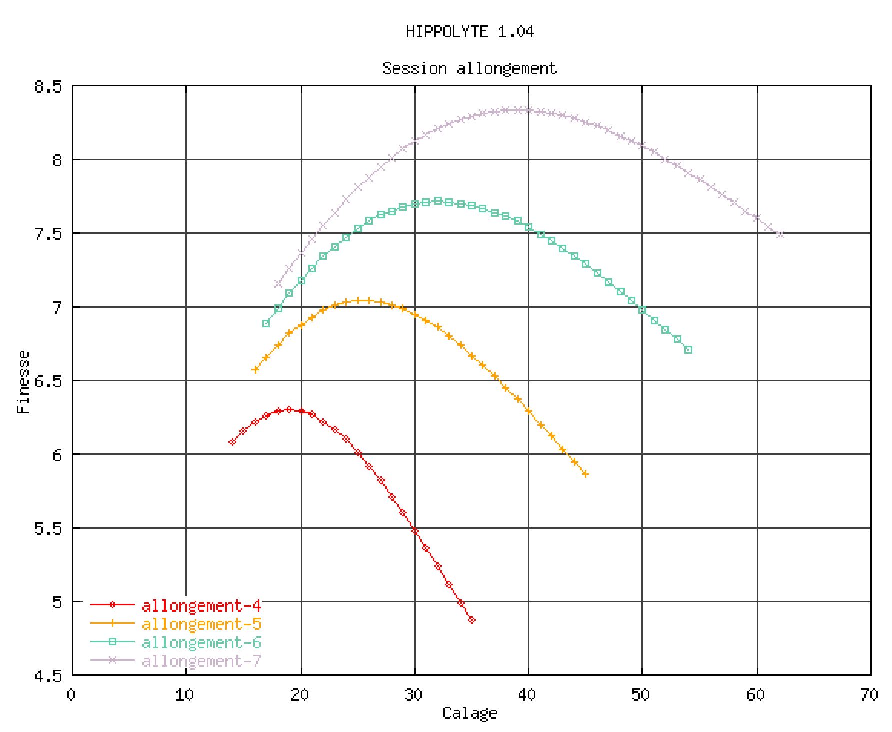
[12] Grands calages.

7.4.2 Influence de l'allongement

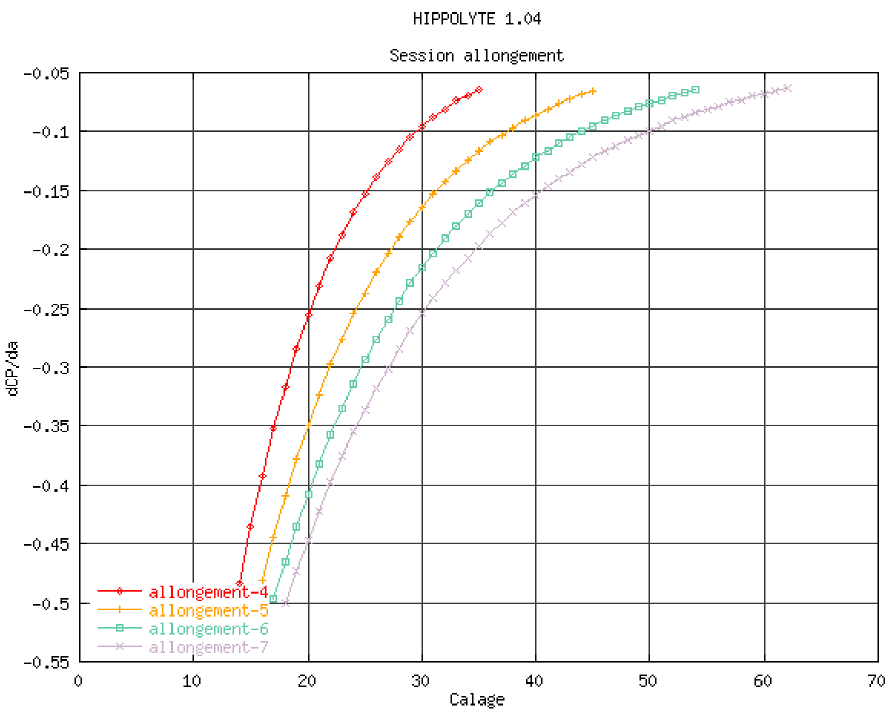
Autre exemple : l'influence de l'allongement d'une aile sur ses performances.



Courbes de comparaison des vitesses de vol



Courbes de comparaison des finesses de vol



Courbes de comparaison des migrations du centre de poussée

Il sera laissé, ici, au lecteur, le soin d'interpréter ces courbes et d'en tirer les conclusions pertinentes.

7.5 Validation

Ecrire un simulateur de parapentes est une chose, écrire un simulateur pertinent en est une autre. Il convient donc de comparer les renseignements fournis par *Hippolyte* aux mesures effectuées en vol et acquises avec l'expérience du vol libre et de la conception d'aéronefs.

Jusqu'ici, *Hippolyte* évolue dans le bon sens : aucune des simulations effectuées n'est contradictoire, et aucune d'entre elles n'a été à l'encontre des mesures réellement effectuées au cours des vols tests.

Du point de vue de la précision des valeurs fournies par *Hippolyte*, il reste à établir une campagne de mesures, afin de déterminer un pourcentage d'erreur en comparaison de la réalité. Cette campagne à mener est une tâche ardue du fait du nombre important de paramètres à maîtriser et de la difficulté de les mesurer. Certains outils de mesures de position de centre de poussée ont été, à ce jour, construits, mais leur mise en œuvre reste très lourde.

8 Conclusion

L'étude scientifique de la mécanique de vol d'un parapente reste exceptionnelle.

Les centres de formation et de recherche dans ce domaine sont rares pour ne pas dire inexistants, exceptés à l'Université de Pau où Pierre Puiseux a déjà mené quelques travaux théoriques et numériques, et dans quelques centres de l'armée américaine ou de la NASA qui étudient des structures gonflables pour les retours de missions spatiales.

Les bases de données expérimentales sont quasi inexistantes pour des profils creux, et l'approche de structures hautement déformables révèlent des subtilités relativement mal connues à l'heure actuelle.

L'étroitesse du marché du vol libre, enfin est un frein considérable au développement de travaux allant dans ce sens.

Malgré tout, on peut estimer qu'*Hippolyte* est un outil de simulation performant. Performant par sa complétude : à partir des paramètres de base, *Hippolyte* effectue toutes les phases de la simulation, et pas seulement l'étude du profil. Il intègre indifféremment deux méthodes de simulation (2D et 3D). Il calcule également l'équilibre longitudinal. Performant par son ouverture : c'est un code ouvert et évolutif. Les objet peuvent être aisément remplacés par d'autres plus complets ; il est facilement configurable à partir d'un fichier d'initialisation. Performant par sa souplesse d'utilisation : une interface graphique est proposée pour plus de convivialité, et pour ceux qui préfèrent, *Hippolyte* peut être lancé en mode texte. Plusieurs sessions peuvent être lancées d'un coup. Un simple fichier de description permet de mettre *Hippolyte* en action. Des valeurs par défaut réalistes sont attribuées si l'une d'entre elles n'est pas renseignée. Performant par la quantité des résultats fournis : un répertoire de résultats est consacré à chaque configuration de chaque session. Des scripts permettent une visualisation claire et rapide des données.

A côté de cela, il reste encore du travail autour de ce simulateur. L'interface graphique doit être complétée pour une visualisation plus simple des courbes de comparaison. Certains objets, encore un peu simplistes, doivent être améliorés pour plus de précision. La liste des imperfections reste ouverte et est à compléter par les futurs utilisateurs.

Que peut attendre un concepteur d'un tel programme ?

Il est clair que la simulation en deux dimensions est peu précise (cela reste à vérifier). En revanche, il peut en tirer des indications qualitatives intéressantes et rapides. Il peut rechercher un profil ayant des caractéristiques bien précises (portance élevée, migration du centre de poussée faible…). Il peut visualiser rapidement les effets de tel ou tel changement sur le comportement du parapente. La simulation par *Hippolyte* lui indiquera que s'il met un profil plus portant, au même calage, il perdra en vitesse, mais gagnera en finesse, le centre de poussée aura des migrations plus importantes et le parapente sera plus instable… ou toute autre conclusion.

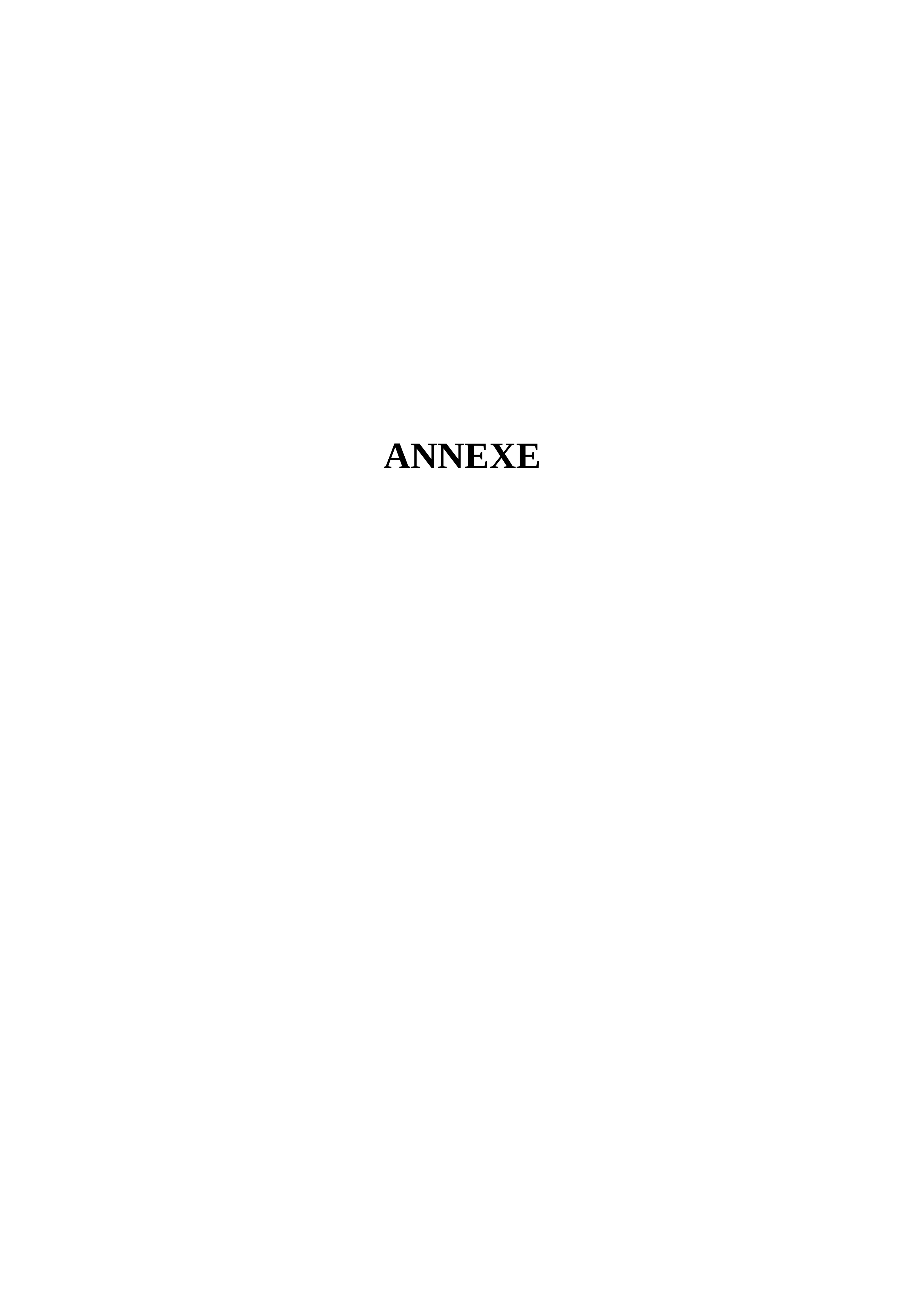
La simulation en trois dimensions, par contre, plus coûteuse en temps, permet de préciser les résultats du 2D et d'obtenir des valeurs plus proches de la réalité. Reste à savoir si la précision souhaitée est de l'ordre du dixième ou du centième de km/h. Elle permet, également, de prendre en compte des phénomènes ignorés en deux dimensions pouvant avoir un forte influence sur le vol. Je pense plus particulièrement à la forme en plan ou au lobe de la voilure, au vrillage ou à l'effilement en bout d'aile. Elle permet une amorce de

simulation sur des voilures non symétriques en vue d'une intégration dans des applications de niveaux supérieurs capables de modéliser des phénomènes transitoires plus complexes.

A l'heure actuelle, il convient de confectionner une base de données sur les influences de chacun des paramètres modifiables pour la construction d'un parapente, afin d'accélérer les réflexions et les tâtonnements de conception.

Une comparaison avec des mesures en vol est encore à faire pour quantifier les approximations d'*Hippolyte*, mais nécessitera des investissements humains et en temps importants, tant les paramètres influençant le vol sont nombreux.

La voie est ouverte, à poursuivre donc…



ANNEXE

Glossaire

A

Accélérateur Système permettant au pilote de déformer le profil de son aile, si bien qu'elle devienne plus piqueuse (diminution du calage).

Aile Voilure du parapente. Souvent appelée « voile ».

Allongement Rapport de l'envergure au carré par la surface de l'aile, ou bien de l'envergure par la corde moyenne. Représente combien de fois la voile est plus « longue » que « large ».

Ascendance Masse d'air qui monte.

Assiette Angle formé par l'horizontale et par la corde de l'aile.

B

Biplace Voile conçue pour transporter deux personnes.

Bord d'attaque Avant de l'aile.

Bord de fuite Arrière de l'aile.

C

Caisson Partie de l'aile comprise entre deux nervures ; les caissons se gonflent pour donner la forme au profil.

Calage Distance du point d'intersection de la corde et de la perpendiculaire à cette corde menée depuis le pilote au bord d'attaque, exprimée en pourcentage de corde.

Cambrure Distance maximale entre la ligne moyenne du profil et la corde, exprimée en pourcentage de corde. Les profils symétriques ont une cambrure nulle.

Centrage Distance entre le centre de gravité du système et le bord d'attaque, exprimée en pourcentage de corde.

Centre de poussée Point d'application des forces aérodynamiques appliquées à l'aile.

Commande Poignée de frein reliée au bord de fuite du parapente servant à se diriger.

Compétition (voile de) Voile de haute performance. Actuellement les voile de compétition sont très rapides et très fines (grande finesse), mais délicates à piloter.

Cône de suspentage Ensemble des suspentes

Corde Ligne imaginaire entre le bord d'attaque et le bord de fuite du profil.

Corde moyenne Moyenne des longueurs de corde sur toute l'envergure de la voile.

D

Décrochage Perte brutale de portance due à une incidence trop grande.

Dérapage Angle entre le vent relatif et la direction de la voile

Drag chut Petit parachute destiné à augmenter la traînée (et donc à dégrader la finesse) à l'atterrissage des deltaplanes.

E

Elévateur Sangle reliant la sellette aux suspentes.

Envergure Distance entre les bords droit et gauche de la voile.

Epaisseur Plus grande distance entre l'extrados et l'intrados d'un profil, exprimée en pourcentage de corde.

Extrados Partie supérieure de l'aile.

F

Facteur d'efficacité d'Oswald Facteur correctif introduit le calcul de la traînée induite, noté *e*, destiné à prendre en compte une partie de la traînée de profil. Sa valeur est de l'ordre de 0.9.

Fermeture Déformation du profil due, généralement, à une incidence trop faible.

Finesse Rapport de la vitesse horizontale et de la vitesse verticale. On précise souvent le référentiel lorsqu'il peut y avoir ambiguïté. On parle alors de finesse air ou de finesse sol.

Forme en plan Forme de l'aile vue de dessus.

Foyer aérodynamique Point fixe d'un profil, point d'application des variations de $\overrightarrow{RFA}$.

Frein Cf. : commande.

H

Hippolyte Super programme de simulation développé par Jérôme Sarthe et Pierre Puiseux. Comme ils sont forts !

I

Incidence Angle compris entre la corde du profil et le vent relatif.

Intercaisson Cf. : nervure.

Intrados Partie inférieure du profil.

L

Lacet Mouvement de rotation de parapente autour d’un axe vertical.

Ligne moyenne Lieu des centres des cercles tangents à l’extrados et à l’intrados du profil.

Lobe Forme de l’aile vue de face.

N

NACA National Advisory Comitee for Aeronautics, prédécesseur de la NASA.

Nervure Pièce de tissu reliant l’extrados et l’intrados, déterminant le profil de la voilure.

NERVURES Société de conception et de fabrication de parapentes.

O

Oswald Cf. : facteur d’efficacité d’Oswald.

P

Plané (angle de) Angle formé par l’horizontale et la direction du vent relatif.

Point de calage Point d’intersection de la perpendiculaire à la corde menée depuis le pilote et de la corde elle-même.

Portance Composante de force aérodynamique dirigée perpendiculairement à la trajectoire, assurant le vol.

R

Reynolds Nombre sans dimension caractérisant un écoulement. Si l est une longueur de référence, ν la viscosité cinématique de l’air, et V la vitesse de l’écoulement, on a $\Re e = \frac{Vl}{\nu}$.

$\overrightarrow{RFA}$ Résultante des forces aérodynamiques

Roulis Mouvement autour de l’axe longitudinal de l’aile.

S

Sellette Siège dans lequel est installé le pilote en vol.

Solo Se dit d’une voile conçue pour accepter une seule personne.

Stabilisateur Morceau de tissu (souvent gonflable) en bout d’aile servant à réduire la traînée induite.

Stabilo Cf. : stabilisateur

Suspente corde en kevlar ou en polyéthylène reliant le pilote à la voile.

T

Tangage Mouvement autour de l’axe transversal de l’aile.

Taux de chute Vitesse verticale de descente du parapente.

Thermique Ascendance causée par un échauffement de l’air au contact d’un sol chaud.

Tourbillons marginaux Tourbillons créés par le contournement de l’air en bout d’aile dû à la différence de pression.

Traînée Composante de force aérodynamique s’opposant à l’avancement d’un corps placé dans un écoulement.

Traînée induite Traînée engendrée par les tourbillons marginaux.

Trajectoire Axe de descente du parapente.

Trim Système permettant de modifier le calage d’un parapente.

V

Vent relatif Vent apparent que reçoit le pilote en l’air.

Vidage Phénomène entraînant la fermeture de la voile survenant lorsque l’incidence de vol est trop faible.

Voile Autre nom pour "aile"

Vortex Cf. : tourbillons marginaux.

Voûte Cf. : lobe

Vrillage Différence de calage entre le centre de l’aile et les bouts d’aile.

Liste des variables

A	Bord d'attaque
B	Bord de fuite
C	Point de calage
CP	Centre de poussée
F	Foyer aérodynamique
L	Point d'application de la traînée des suspentes
P	Position du pilote
l	Corde de l'aile
σ	Distance entre le point de calage et le bord d'attaque
$\bar{\sigma}$	Distance entre le point de calage et le bord d'attaque en pourcentage de corde
δ	Distance entre le centre de poussée et le bord d'attaque
$\bar{\delta}$	Distance entre le centre de poussée et le bord d'attaque en pourcentage de corde
f	Distance du foyer aérodynamique au bord d'attaque
$\bar{f}$	Distance du foyer aérodynamique au bord d'attaque en pourcentage de corde
b	Envergure de la voile
$\bar{b}$	Allongement
λ	Allongement
s	Longueur du cône de suspentage
S	Surface de la voile
p	Position de la cambrure maximum en pourcentage de corde
t	Epaisseur du profil
z	Cambrure du profil
m	Masse
m_a	Masse de l'aile
m_p	Masse du pilote
α	Incidence
α_0	Incidence de portance nulle
γ	Angle de plané
θ	Assiette
φ	Finesse
R	Repère lié à la voile
R_0	Repère terrestre
R_a	Repère aérodynamique
$\overrightarrow{RFA}$	Résultante des forces aérodynamiques
$\vec{P}$	Force de portance
$\vec{T}$	Force de traînée

$\vec{T_s}$ Force de traînée des suspentes
$\vec{T_p}$ Force de traînée du pilote
C_x Coefficient de traînée
C_{x0a} Coefficient de traînée irréductible de l'aile
C_{xa} Coefficient de traînée totale de l'aile
C_{xi} Coefficient de traînée induite
C_{xp} Coefficient de traînée du pilote
C_{xs} Coefficient de traînée des suspentes
C_{xT} Coefficient de traînée totale
C_z Coefficient de portance
C_{zmax} Coefficient de portance maximum
$C_{z\alpha}$ Pente du coefficient de portance linéarisée
C_m Coefficient de moment
C_{m0} Coefficient de moment d'incidence de portance nulle
$C_{m\alpha}$ Pente du coefficient de moment linéarisé
C_y Coefficient de tension en envergure
C_l Coefficient de lacet
C_n Coefficient de roulis
$\Re e$ Nombre de Reynolds
V_∞ Vitesse de l'écoulement à l'infini
q_0 Pression dynamique
ρ Masse volumique de l'air
$\vec{g}$ Accélération de la pesanteur
e Facteur d'efficacité d'Oswald

Bibliographie

- B.W. McCormick, *Aerodynamics, Aeronautics and Flight Mecanics*, ed John Wiley & Sons, 1979
- J. Moran, *An Introduction to Theoretical and Practical Aerodynamics*, p 260, ed John Wiley & Sons, 1984
- *Comprehensive Reference Guide to Airfoil Sections for Light Aircraft,* Aviation Publications, 1982
- Pierre Puiseux, *Equilibre longitudinal d'un parapente*, http://www.univ-pau.fr/~puiseux/simulation/equilibre2D/equilibre.htm
- Hervé Belloc, *Etude Expérimentale en Soufflerie de la Traînée du Pilote de Parapente*, ENSICA, 1999
- Gabriel Dunkel, *Mécanique d'un parapente,* Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1997
- *Le langage C++*, Simon & Schuster McMillan, 1998
- Poulique, *Introduction au langage Perl*, Université de Rennes, http://www.med.univ-rennes1.fr/~poulique/cours/perl/
- Xavier Murillo, *Parapente*, 1998
- Gérald Delorme, *Voler en parapente*, 1995

Remerciements

Xavier Demoury Tout d’abord pour m’avoir reçu chez NERVURES, pour ses compétences de concepteur, pour sa patience à me supporter, pour sa disponibilité à répondre à mes questions et son dévouement, pour sa gentillesse tout simplement humaine.

Pierre Puiseux pour ses connaissances théoriques et pratiques de la simulation numérique, ce qui m’a beaucoup aidé au développement d’*Hippolyte*, pour ses bons conseils, pour sa passion du vol, ce qui m’a permis de m’aérer de temps en temps.

Marcel Bertrand pour m’avoir poussé à cogiter sur certains problèmes de calage.

Vincent Staub pour son soutien moral pendant la rédaction de ce rapport.

Marc & Marc pour leur gentillesse et le soutien qu’ils m’ont apporté et pour m’avoir sorti de devant l’écran de l’ordinateur quand il faisait beau.

Les couturières pour leur café, leur sourire et leur bonne humeur.

Les professeurs de l’Université de Savoie.

Mes parents pour avoir été mes critiques et corecteurs...

…et tous ceux que je pourrais oublier.

Ce document a été réalisé sous Word 7.
Les photos ont été travaillées par Corel Photo Paint 8.
Les schémas ont été tracés à l'aide de Corel Draw 8

par Jérôme Sarthe

___

Septembre 1999


ACCES INTERDIT
AUX
PARAPENTISTES
ET DELTISTES